
TEKNILLINEN KORKEAKOULU

SÄHKÖ- JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN OSASTO

RADIOLABORATORIO

ALEKSI TAMMINEN

EPÄSUORA HOLOGRAFINEN KUVAUS

MILLIMETRIAALTOALUEELLA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa _____. _____. _____.

Työn valvoja

Professori Antti Räisänen

Työn ohjaaja

TkT Juha Ala-Laurinaho

Tekijä:	Aleksi Tamminen
Työn nimi:	Epäsuora holografinen kuvaus millimetriaaltoalueella
Päivämäärä:	17.10.2007
	Sivumäärä: 112
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri:	S-26 Radiotekniikka
Työn valvoja:	Professori Antti Räisänen
Työn ohjaaja:	TkT Juha Ala-Laurinaho
<p>Tässä diplomityössä käsitellään radioaaltoihin perustuvaa kuvausta. Erilaisiin kuvausmenetelmiin tutustutaan työn kirjallisuuskatsauksessa. Työ käsittelee erityisesti epäsuoraa holografista kuvausta, johon tutustutaan työn teoreettisessa ja kokeellisessa osuudessa. Työssä on toteutettu epäsuoraan holografiseen kuvaukseen soveltuva laitteisto, jonka tuottamat millimetriaaltokuvat esitellään.</p> <p>Työn ensimmäisessä osassa tehdään jako aktiivisiin ja passiivisiin kuvausmenetelmiin. Eri kuvausmenetelmien ominaisuuksia arvioidaan ja vertaillaan keskenään. Painopiste on sellaisissa kuvausmenetelmissä, jotka soveltuvat turvallisuuteen liittyvään kuvaamiseen, kuten turvatarkastuksiin lentokentillä. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi eri menetelmiin perustuvaa aiempaa kokeellista työtä, ja saatujen radioaaltokuvien perusteella arvioidaan eri kuvausmenetelmien suorituskykyä.</p> <p>Työn toisessa osassa käsitellään aktiivisen, epäsuoran holografisen kuvauksen teoriaa. Kuvauksen laskennalliseen osuuteen liittyvät tasoaaltospektri ja kompleksisen kentän palautus johdetaan käytäntöön soveltuville diskreeteille suureille. Holografisen kuvauksen perusteoriasta johdetaan kuvauslaitteistolta vaaditut ominaisuudet: apertuurin koko, kentän näytteistysväli apertuurilla ja referenssikentän tulokulma. Kuvauslaitteiston geometriasta saadaan teoreettinen erotuskyky ja näkökenttä. Lisäksi esitellään laajakaistaisen epäsuoran holografisen kuvauksen periaate ja arvioidaan erilaisten referenssikenttien soveltuvuutta epäsuoraan holografiseen kuvaukseen.</p> <p>Työn kokeellisessa osuudessa epäsuora holografinen kuvaus toteutettiin 310 GHz:llä pystypolarisaatiolla. Referenssikenttänä käytettiin sekä tasoaaltoa että Gaussin keilaa. Kuvaus toteutettiin vertailun vuoksi myös suoralla holografisella menetelmällä. Eri kohteista saatuja millimetriaaltokuvia arvioitiin. Paras suorituskyky saatiin $40 \times 40 \text{ cm}^2$:n apertuurilla käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä, jolloin saavutettu erotuskyky 1,5 m:n päässä kohteesta on noin 2 mm. Myös tasoaaltoreferenssi soveltuu epäsuoraan holografiseen kuvaukseen. Käytettäessä $14 \times 14 \text{ cm}^2$ apertuuria ja tasoaaltoreferenssiä millimetriaaltokuvassa voitiin erottaa alle 1 cm:n kokoisia yksityiskohtia.</p> <p>Lisäksi käsitellään erilaisia keinoja parantaa saatujen kuvien laatua ja helpottaa holografiseen kuvaukseen liittyviä laitteistovaatimuksia. Lopuksi saatuja tuloksia verrataan työn ensimmäisessä osassa käsiteltyjen kuvausmenetelmien tuloksiin.</p>	
<p>Avainsanat: aktiivinen kuvaus, holografia, kompleksisen kentän palautus, passiivinen kuvaus, tasoaaltospektri</p>	

Author:	Aleksi Tamminen
Name of Thesis:	Indirect holographic imaging at millimeter wavelengths
Date:	17.10.2007
	No. of pages: 112
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S-26 Radio Engineering
Supervisor:	Professor Antti Räisänen
Instructor:	Juha Ala-Laurinaho, Dr. Sc.(Tech.)
<p>In this Master's Thesis, imaging based on radiowaves is studied. Different methods of radiowave imaging are familiarized in the literature review of the thesis. The emphasis of the thesis is in indirect holographic imaging, which is discussed in the theoretical and empirical part of the thesis. An equipment for indirect holographic imaging is developed and the resulting millimeter-wave images are presented.</p> <p>In the first part of the thesis, radiowave imaging methods are divided into passive and active methods. The properties of different methods are evaluated and compared with each other. The emphasis of the thesis is especially in imaging methods suitable for security-related applications, such as passenger control at airports. In the literature review, the previous experimental work based on different imaging methods is discussed and the performance of each method is assessed based on the results reported.</p> <p>In the second part of the thesis, the theory of active, indirect holographic imaging is introduced. The discretized form of the plane wave spectrum and the complex field retrieval related to the computational phase of indirect holographic imaging are derived. Starting from the basic theory of holographic imaging, the required properties of the imaging equipment are derived. The properties include the size of the aperture, sample spacing in the aperture and the incidence angle of the reference field. The theoretical resolution and the field of view are given by the geometry of the imaging equipment. In addition, the principle of wide-band holographic imaging is presented and suitability of different reference fields for indirect holographic imaging is evaluated.</p> <p>An indirect holographic imaging at 310 GHz at vertical polarization is realized in the experimental part of the thesis. Both plane wave and Gaussian beam were used as the reference field in the experiment. For comparison, the holographic imaging was also realized with directly measure complex field. Millimeter-wave images of different objects are evaluated. The best performance was achieved with an aperture sized $40 \times 40 \text{ cm}^2$ with a Gaussian beam as the reference field. The resolution is about 2 mm at 1.5 m distance from the aperture. A planar reference wave is also suitable for holographic imaging and with a $14 \times 14 \text{ cm}^2$ aperture, details smaller than 1 cm are discernable.</p> <p>In addition, different means to enhance the quality of the millimeter-wave images and to ease the requirements for indirect holographic imaging are discussed. Finally, the results of the experimental part of the thesis are compared to those reported in literature.</p> <p>Keywords: active imaging, complex field retrieval, holography, passive imaging, plane wave spectrum</p>	

ESIPUHE

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun (TKK) Sähkö- ja tietoliikenneosastolla Radiolaboratoriossa

Haluan kiittää työn valvojaa, professori Antti Räisästä mahdollisuudesta työskennellä Radiolaboratoriossa erittäin mielenkiintoisen ja haastavan aiheen parissa.

Työn ohjaajaa, Juha Ala-Laurinaho haluan kiittää lukuisista neuvoista ja keskusteluhetkistä työn edetessä.

Lisäksi haluan kiittää muita hologrammiryhmän jäseniä ja kaikkia Radiolaboratoriossa, jotka auttoivat ja kannustivat minua työssäni lukuisia kertoja, ensimmäisestä kesätyöjaksosta lähtien. Erityiskiitoksen ansaitsee myös poikkitieteellinen kahviporukka, joka käynnisti päivän niin monta kertaa. Kiitos myös yhteisestä ajasta laboratorion ja töiden ulkopuolella.

Diplomityö ei ole ainoastaan nämä 112 sivua, vaan suurin osa siihen vaaditusta työstä on tehty kuluneen viiden opiskeluvuoden aikana. Siten iso kiitos kuuluu myös opiskelutovereille, joiden kanssa toisiamme auttaen selätimme diplomi-insinöörin tutkintoa laskuharjoitus kerrallaan.

Lopuksi haluan kiittää läheisiäni, jotka ovat tukeneet minua kaikin tavoin.

Espoossa 17.10.2007

Aleksi Tamminen

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ESIPUHE	4
SISÄLTÖ	5
SYMBOLILUETTELO	8
LYHENTEET	13
1 JOHDANTO	14
<i>1.1 YLEISTÄ RADIOAALLOILLA KUVAUKSESTA</i>	<i>14</i>
<i>1.2 HOLOGRAFIA</i>	<i>15</i>
<i>1.3 TYÖN SISÄLTÖ JA TAVOITE</i>	<i>16</i>
2 RADIOAALTOIHIN PERUSTUVAT KUVAAUSMENETELMÄT	18
<i>2.1 PASSIIVISET KUVAAUSMENETELMÄT</i>	<i>18</i>
2.1.1 KIRKKAUSLÄMPÖTILA	18
2.1.2 RADIOMETRIT JA ILMAISIMET	21
2.1.3 ANTENNIT	22
<i>2.2 AKTIIVISET KUVAAUSMENETELMÄT</i>	<i>25</i>
2.2.1 HOLOGRAFINEN KUVAAUS	30
2.2.2 EPÄSUORA HOLOGRAFINEN KUVAAUS	31
3 EPÄSUORAN HOLOGRAFISEN KUVAUKSEN TEORIA	34
<i>3.1 KOORDINAATISTO JA PERUSMUUTTUJAT</i>	<i>34</i>
<i>3.2 TASOAALTOSPEKTRI</i>	<i>35</i>
3.2.1 TASOAALTOSPEKTRI JATKUVILLA SUUREILLA	35
3.2.2 TASOAALTOSPEKTRI DISKREETEILLÄ SUUREILLA	38
3.2.3 LAAJAKAISTAINEN TASOAALTOSPEKTRI	39
<i>3.3 TASOAALTOSPEKTRI EPÄSUORASSA HOLOGRAFISESSA KUVAUKSESSA</i>	<i>40</i>
3.3.1 KOHDEKENTÄN PALAUTTAMINEN INTERFERENSSIKUVIOSTA	40
3.3.2 PIENIN REFERENSSIKENTÄN TULOKULMA JA EROTUSKYKY	42
3.3.3 TASOAALTO REFERENSSIKENTTÄNÄ	44
3.3.4 PALLOAALTO REFERENSSIKENTTÄNÄ	45
4 EPÄSUORA HOLOGRAFINEN KUVAAUS 310 GHz:LLÄ	47
<i>4.1 KUVAAUSLAITTEISTO</i>	<i>47</i>
4.1.1 TASOSKANNERI	47
ALEKSI TAMMINEN	DIPLOMITYÖ
	5

EPÄSUORA HOLOGRAFINEN KUVAAUS MILLIMETRIAALTOALUEELLA	SISÄLTÖ
4.1.2 LÄHETIN-VASTAANOTIN	47
4.1.3 ANTENNIT	48
4.1.4 KUVAAUSALUEEN GEOMETRIA	49
4.1.5 TASOMAISEN JA GAUSSISEN REFERENSSIKENTÄN TULOKULMA SEKÄ NÄYTTÄISTYSVÄLI APERTUURILLA	49
4.1.6 KOHTEEN VALAISU	52
4.1.7 TASOMAINEN REFERENSSIKENTTÄ HEIJASTUSTYYPPISELLÄ VAIHEHOLOGRAMMILLA	53
4.1.8 GAUSSIN KEILAN MUOTOINEN REFERENSSIKENTTÄ TORVIANTEENNILLA	54
4.1.9 KOHTEEN SUUNTAUS	55
4.1.10 VIRTUAALINEN APERTUURI	55
4.2 KUVANMUODOSTUSALGORITMI	55
4.2.1 FFT JA IKKUNOINTI	56
4.2.2 KOHDEKENTÄN PALAUTUS	57
4.2.3 KUVAN REKONSTRUKTIO	59
5 MILLIMETRIAALTOKUVAT	60
5.1 REFERENSSIKENTTÄNÄ TASOAALTO	61
5.1.1 TYHIÄ KUVAAUSALUE JA ALUMININEN SUORAKAIDE	61
5.1.2 METALLI-, MUOVI- JA PUUTANKO	63
5.1.3 TESTIKUVIO	66
5.2 REFERENSSIKENTTÄNÄ GAUSSIN KEILA	71
5.2.1 TESTIKUVIO	71
5.2.2 SIGNAALI-KOHINA SUHDE MILLIMETRIAALTOKUVISSA	76
5.2.3 APERTUURIN KOON VAIKUTUS	80
5.2.4 APERTUURIN PAIKAN VAIKUTUS	81
5.2.5 KUVAAUS ALINÄYTTÄISTETTYLLÄ HOLOGRAMMILLA	83
5.3 KUVANKÄSITTELY	85
5.3.1 GRAY LEVEL MAPPING	85
5.3.2 UNSHARP MASKING	88
6 POHDINTOJA EPÄSUORASTA HOLOGRAFISESTA KUVAAUKSESTA	90
6.1 ERI KUVAAUSMENETELMIEN SUORITUSKYVYN VERTAILUA	90
6.1.1 KOHTEEN VALAISU, APERTUURIN KOKO JA EROTUSKYKY	91
6.1.2 NÄKÖKENTTÄ	91
6.1.3 MUITA HUOMIOITA	92
6.2 TARVITTAVIA PARANNUKSIA EPÄSUORAAN HOLOGRAFISEEN KUVAAUKSEEN	93
7 YHTEENVETO	94

VIITTEET	97
LIITE A: REFERENSSIKENTTIEN TASOAALTOSPEKTRIT	102
LIITE B: KUVAUSALUEEN KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ ILMAN KOHDETUKEA	103
LIITE C: KUVAUSALUEEN KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ KOHDETUEN KANSSA	104
LIITE D: ALUMIINISEN SUORAKAITEEN KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ	105
LIITE E: METALLI-, PVC- JA PUUTANKOJEN KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ	106
LIITE F: METALLI-, PVC- JA PUUTANKOJEN KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ, MITATUN AMPLITUDIN IKKUNOINTI	107
LIITE G: ALUMIINISEN TESTIKUVION KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ	108
LIITE H: PEITETYN TESTIKUVION KUVAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ	109
LIITE I: TESTIKUVION KUVAUS GAUSSISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ, 14 x 14 cm ² :N APERTUURI	110
LIITE J: TESTIKUVION KUVAUS GAUSSISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ, 40 x 40 cm ² :N APERTUURI	111
LIITE K: KUVAUS 4-KERTAISESTI ALINÄYTTTEISTETYLLÄ APERTUURILLA	112

SYMBOLILUETTELO

A_0^+	positiiviseen x -akselin suuntaan etenevää kenttää kuvaava tasoaaltospektrin ratkaisu
A_0^-	negatiiviseen x -akselin suuntaan etenevää kenttää kuvaava tasoaaltospektrin ratkaisu
A_k	kohdekentän amplitudijakauma apertuurilla
A_r	referenssikentän amplitudijakauma apertuurilla
A_y	y -suuntaisesti polarisoituneen sähkökentän tasoaaltospektri
a	vakio logaritmisessa ja käänteisessä logaritmisessa funktiossa
B	magneettivuon tiheys
B	kappaleen kirkkaus
B_k	kohdekentän aaltolukukaistanleveys
B_M	mustan kappaleen kirkkaus
BR	millimetriaaltokuvan kirkkaus
B_r	referenssikentän aaltolukukaistanleveys
B_r^x	referenssikentän aaltolukukaistanleveys x -suunnassa
B_r^y	referenssikentän aaltolukukaistanleveys y -suunnassa
\overline{BR}_{kirkas}	millimetriaaltokuvan kirkkauden keskiarvo kirkkaalla alueella
\overline{BR}_{tumma}	millimetriaaltokuvan kirkkauden keskiarvo tummalla alueella
BW	radiojärjestelmän kaistanleveys
b	vakio logaritmisessa ja käänteisessä logaritmisessa funktiossa
c	valon nopeus
D	sähkö vuon tiheys
D_0	Butterworth-tyyppisen ikkunointifunktion puoliarvoleveys
$D_{ant.}$	antennin halkaisija
D_k	kohteen halkaisija
D_B	etäisyys Butterworth-tyyppisen ikkunointifunktion maksimista
DY	millimetriaaltokuvan kirkkauden dynaaminen alue
d	vakio logaritmisessa ja käänteisessä logaritmisessa funktiossa

E	sähkökentän voimakkuus
E_0	sähkökentän amplitudi
$E_{heij.}$	kohteesta heijastunut kompleksinen sähkökenttä
E_k	kompleksinen kohdekenttä
$E_{k,I}$	kohdekentän imaginääriosia
$E_{k,R}$	kohdekentän reaaliasia
E_r	kompleksinen referenssikenttä
$E_{r,I}$	referenssikentän imaginääriosia
$E_{r,R}$	referenssikentän reaaliasia
$E_{valaisu}$	kohdetta valaiseva kompleksinen sähkökenttä
E_y	sähkökentän y-komponentti
e	käsittlemättömän millimetriaaltokuvan kirkkaus
e_1	alkuperäisen kirkkauden 1. raja-arvo <i>gray level mapping</i> -algoritmissa
e_2	alkuperäisen kirkkauden 2. raja-arvo <i>gray level mapping</i> -algoritmissa
f	taajuus
$f_{keskit.}$	tasoaaltospektrin taajuuskaistan keskitaajuus
f_l	tasoaaltospektrin taajuusnäytepiste
G_{hs}	harmaasävyjen lukumäärä millimetriaaltokuvassa
g	käsitellyn millimetriaaltokuvan kirkkaus
g_1	käsitellyn kirkkauden 1. raja-arvo <i>gray level mapping</i> – algoritmissa
g_2	käsitellyn kirkkauden 2. raja-arvo <i>gray level mapping</i> – algoritmissa
H	magneettikentän voimakkuus
H	Butterworth-tyyppinen ikkunointifunktio
h	Planckin vakio
I	interferenssikuvion teho
i	tasoaaltospektrin x-komponentin näytepisteen indeksi
J	virrantiheys
j	imaginäärilukuyksikkö
k	aaltovektori
k	aaltovektorin pituus, aaltoluku
k	tasoaaltospektrin y-komponentin näytepisteen indeksi

k_B	Boltzmannin vakio
$k_{kriit.}$	kriittinen aaltoluku
k_s	alinäytteistetyin aperttuurin näytteistykseen tilataajuus
k_s^x	alinäytteistetyin aperttuurin näytteistykseen tilataajuus x -suunnassa
k_s^y	alinäytteistetyin aperttuurin näytteistykseen tilataajuus y -suunnassa
k_x	aaltovektorin x -suuntainen komponentti
$k_{x,maks.}$	suurin aaltoluvun x -suuntainen komponentti aperttuurilla
k_y	aaltovektorin y -suuntainen komponentti
k_z	aaltovektorin z -suuntainen komponentti
$L_{atm.}$	ilmakehän vaimennus
L_x	aperttuurin puolileveys x -suunnassa
L_y	aperttuurin puolileveys y -suunnassa
l	tasoaaltospektrin taajuusnäytepisteen indeksi
M	aperttuurin näytepisteiden lukumäärä x -suunnassa
m	näytepisteen indeksi x -akselilla
N	aperttuurin näytepisteiden lukumäärä y -suunnassa
N_i	vastaanotinten lukumäärä interferometrisessä kuvauksessa
N_{kok}	kokonaiskohinataso
N_m	mitattu kohinataso
N_s	simuloitu kohinataso
n	näytepisteen indeksi y -akselilla
P	tasoaaltospektrin taajuusnäytepisteiden lukumäärä
p	Butterworth-tyyppisen ikkunointifunktion asteluku
q	vakio differentiaaliyhtälön ratkaisussa
R_{kohde}	kohteen heijastuskerroin
\mathbf{r}	paikkavektori
S	keskihajonta
T	kirkkauslämpötila
$T_{k,fys.}$	kohteen fysikaalinen lämpötila
$T_{k,näen.}$	kohteen näennäinen kirkkauslämpötila

$T_{t,fys.}$	taustan fysikaalinen lämpötila
$T_{taivas.,fys.}$	taivaan fysikaalinen lämpötila
$T_{t,näen.}$	taustan näennäinen kirkkauslämpötila
$T_{ymp.,fys.}$	ympäristön fysikaalinen lämpötila
\mathbf{u}_x	yksikkövektorin x -komponentti
\mathbf{u}_y	yksikkövektorin y -komponentti
\mathbf{u}_z	yksikkövektorin z -komponentti
u	tasoaaltospektrin x -suuntainen komponentti
u_i	tasoaaltospektrin x -suuntaisen komponentin näytepiste
v	tasoaaltospektrin y -suuntainen komponentti
v_k	tasoaaltospektrin y -suuntaisen komponentin näytepiste
w	tasoaaltospektrin z -suuntainen komponentti
x_m	näytepisteen x -koordinaatti
x_p	pallomaisen referenssikentän lähteen x -koordinaatti
y_m	näytepisteen x -koordinaatti
y_p	pallomaisen referenssikentän lähteen x -koordinaatti
z_a	apertuuritason z -koordinaatti
z_k	kohdetason z -koordinaatti
z_l	näytepisteen z -koordinaatti
z_p	pallomaisen referenssikentän lähteen z -koordinaatti
α	ilmakehän opasiteetti
$\Delta\delta_x$	x -suuntainen erotuskyky kohteen pinnalla
$\Delta\delta_z$	z -suuntainen erotuskyky
ΔT_k	kirkkauslämpötilaerotuskyky
Δu	tasoaaltospektrin x -suuntaisen komponentin näyteväli
Δv	tasoaaltospektrin y -suuntaisen komponentin näyteväli
Δx	näytteistysväli x -suunnassa
Δy	näytteistysväli y -suunnassa
δ_x	koordinaatti kohteen keskeltä x -suuntaan

ε_0	tyhjiön permittiivisyys
ε	emissiivisyys
ε_k	kohteen emissiivisyys
ε_t	taustan emissiivisyys
θ_{3dB}	antennin puolen tehoon keilanleveys
θ_r	referenssientän tulokulma
θ_x	aaltovektorin x -komponenttia vastaava suuntakulma
$\theta_{x,näkök.}$	näkökenttä x -suunnassa
θ_k	kohdekentän vaihejakauma
θ_r	referenssientän vaihejakauma
θ_x	kulma z -akselilta x - z -tasossa
θ_{ref}	referenssientän lähdetä vastaava suuntakulma
$\theta_{tulok.}^{min.}$	referenssientän tulokulman pienin arvo apertuurilla
$\theta_{tulok.}^{maks.}$	referenssientän tulokulman suurin arvo apertuurilla
θ_y	aaltovektorin y -komponenttia vastaava suuntakulma
λ	aallonpituus
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
ρ	tilavaraustiheys
ρ_{PVC}	polyvinyylikloridin heijastuskerroin
ω	kulmataajuus

LYHENTEET

CW	<i>continuous wave</i> , jatkuva aalto
ESA-1	<i>external source association</i> , vektoripiirianalysaattorin taajuusalueen laajennukseen käytettävä lähetinosa
ESA-2	<i>external source association</i> , vektoripiirianalysaattorin taajuusalueen laajennukseen käytettävä vastaanotinosa
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , nopea Fourier-muunnos
MMIC	<i>monolithic microwave integrated circuit</i> , monoliittinen mikroaaltoalueen integroitu piiri
PVC	polyvinyylikloridi
SNR	<i>signal-to-noise-ratio</i> , signaali-kohina – suhde

1 JOHDANTO

Perinteisissä kuvausmenetelmissä käytetään hyväksi sitä sähkömagneettisen spektrin osaa, joka ulottuu infrapunaa aallonpituuksilta aina röntgensäteilyn aallonpituuksille asti. Kuvaus ei rajoitu ainoastaan sähkömagneettisen säteilyn havaitsemiseen, vaan myös vaikkapa ultraääntä voidaan käyttää tutkittavan kohteen tarkasteluun. Eri säteilylajeja käytetään kuvauksessa tutkittavan kohteen luonteesta riippuen. Infrapuna hyödynnetään, kun halutaan havaita pimeää ympäristöä, tutkitaan kohteen pintalämpötilaa tai halutaan vaikkapa nähdä kaukaisia astronomisia kohteita, jotka ovat peittyneinä pölypilvien taakse. Aallonpituuden pienentyessä kuvausmenetelminä ovat tutut näkyvän valon sovellukset ja ultravioletin käyttö auringon koronan tutkimisessa. Röntgensäteilyä käytetään kuvauksessa, kun halutaan nähdä syvälle tiheän kohteen pinnan sisälle, kuten tutkittaessa käsimatkatavaran sisältöä lentokentillä tai hitsausseamien laatua teollisuudessa.

1.1 YLEISTÄ RADIOAALLOILLA KUVAUKSESTA

Tässä työssä käsitellään kuvaamista radioaalloilla, erityisesti holografista kuvaamista. Työn painopiste on turvallisuussovelluksissa, kuten lentokenttien henkilötarkastuksissa, joten työssä pohditaan erilaisten kuvantamismenetelmien soveltuvuutta juuri tähän tarkoitukseen. Nykyisen käsityksen mukaan matalatehoiset radioaallot ovat turvallisia myös kohdistettuna ihmisiin, joka on selvä etu esimerkiksi röntgensäteilyn käyttöön nähden. Radioaalloilla voidaan silti nähdä materiaalin sisällä olevia yksityiskohtia, kunhan edessä oleva ainekerros on edes osittain läpinäkyvä radioaalloilla. Radiotaajuuden säteilyn aallonpituus on paljon suurempi kuin edellä mainituissa kuvausmenetelmissä, ja korkean erotuskyvyn saavuttaminen voi olla vaikeampaa verrattuna lyhyemmän aallonpituuden menetelmiin. Radioaalloilla kuvaaminen voi olla aikaa vievää, sillä kuva muodostetaan usein mekaanisesti suuntaamalla radiovastaanotin eri kohtiin tutkittavaa kohdetta. Kuvan tuottamiseen kestävästi aikaa voidaan lyhentää käyttämällä suurta ryhmää vastaanottimia, joista kukin on fokusoitu tiettyyn kohtaan tutkittavaa kohdetta. Lukuisia radiovastaanottimia sisältävien ryhmien sijoittaminen pieneen tilaan on kuitenkin usein vaikeaa. Vastaanotinryhmän etuna on mahdollisuus erittäin nopeaan kuvan tuottamiseen, jolloin videotaajuinen radioaaltokuvaus on mahdollista. Kuvaus pistetaajuudella tuottaa fokusoidun kuvan vain yhdelle etäisyydelle, jolloin kuva syvästä kohteesta on aina osittain pois fokusesta. Laajakaistaisella kuvausmenetelmällä on kuitenkin mahdollista tuottaa kuvia, joissa kohteen yksityiskohdat ovat näkyvissä myös syvyys suunnassa.

1.2 HOLOGRAFIA

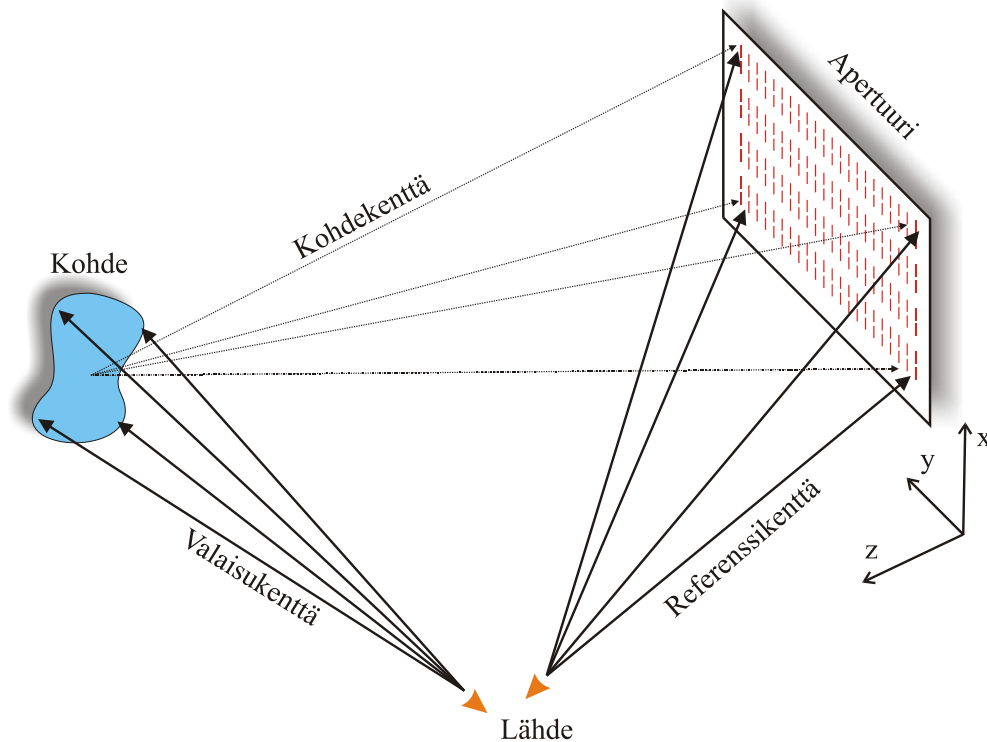
Parantaakseen elektronimikroskoopin erotuskykyä Dennis Gabor kehitti holografiamenetelmän [1]. Emmet Leith ja Juris Upatnieks kehittivät edelleen holografista kuvausta [2], jolloin oli ensimmäistä kertaa mahdollista tuottaa korkealaatuisia holografisia kuvia. Holografiaa on siitä lähtien käytetty monessa sovelluksessa pankkikorttien aitoustunnuksista tiedon tallentamiseen.

Optisessa holografiassa hologrammi on interferenssikuvio, jonka intensiteetti on tallennettu valoherkälle filmille tai sähköiseen muistiin. Interferenssikuvio muodostuu yleensä laservalosta. Laservalolähteitä on vain yksi, mutta lähteeltä tuleva valo jaetaan kahtia siten, että filmille tai valoherkille ilmaisimille tulee osa suoraan ja osa heijastuneena kuvattavasta kohteesta. Eri teitä filmille tai ilmaisimille tulevasta valosta käytetään nimityksiä referenssikenttä suoraan tullee ja kohdekenttä heijastuneelle valolle. Informaatio tutkittavasta kohteesta tallentuu hologrammiin, ja valaistaessa hologrammia referenssikentällä hologrammista heijastunut valo vastaa kohdekenttää, jolloin kuva kohteesta voidaan palauttaa.

Holografia ei ole rajoittunut ainoastaan näkyvän valon alueelle, vaan sitä voidaan suoraan käyttää myös radioaalloilla. Radioholografiassa kuitenkin tarvitaan erilaisia ilmaisimia interferenssikuvion lukemisessa ja optisella alueella käytetyn tasomaisen referenssiaallon tuottaminen voi jossain mielessä olla hankalampaa. Radioaaltoihin perustuvassa holografiassa interferenssikuvio tallennetaan vastaanotinryhmällä. Sähkökentän vaiheen mittaaminen ei ole tarpeen, mikä tekee holografiseen kuvaukseen liittyvästä vastaanotintekniikasta yksinkertaisempaa kuin joissakin muissa antenniryhmiin perustuvissa kuvausmenetelmissä. Yksinkertainen vastaanotintekniikka mahdollistaa suurten antenniryhmien toteuttamisen pienessä tilassa. Radioholografiassa kuvaa ei tuoteta valaisemalla saatua hologrammia uudelleen referenssiaallolla, vaan hologrammi on sähköisessä muodossa tietokoneen muistissa. Hologrammille tehdään matemaattisesti valaisua vastaava operaatio, suodatus ja dekonvoluutio, jolloin mitatusta tehokuvasta saadaan selville kohdeaallon amplitudi- ja vaihejakauma. Kun kompleksinen kenttä apertuurissa tunnetaan, uusi kenttä voidaan laskea tutkittavan kohteen luona, jolloin kohteesta saadaan kuva sen heijastaman kentän perusteella. Yllä esitettyä menetelmää kutsutaan tässä työssä epäsuoraksi holografiseksi kuvaukseksi, erotuksena kirjallisuudessa esiintyvään holografiseen kuvaukseen, jossa kohdekentän vaihe mitataan suoraan. Havainnekuva radioholografiasta on esitetty kuvassa 1.1.

Yksinkertaisimmillaan holografisessa kuvauksessa käytetty vastaanotin voi olla antenniin liitetty nolla-bias -diodi (engl. *rectenna*), jonka ulostulojännite vastaa suoraan vastaanotetun säteilyn tehoa. Ilmaisimena voidaan käyttää diodin sijasta myös bolometria [3], [4], [5]. Diodit soveltuvat paremmin ilmaisimiksi, sillä niitä voidaan käyttää

käyttöympäristöstä riippumatta ja ne ovat herkempiä kuin bolometrit, joita varten joudutaan usein järjestämään hyvin stabiili ja matala käyttölämpötila.



Kuva 1.1. Havainnekuva epäsuorasta holografisesta kuvauksesta.

Radioholografian haasteena on pienitehoisen signaalin ilmaiseminen vastaanotinryhmällä, jonka yksittäisellä ilmaisimella on suhteellisen pieni hyötysuhde. Tasomaisen referenssiaallon luominen siten, että kuvauslaitteen koko ei kasva liian isoksi, voi olla hankalaa. Referenssiaallon lisäksi myös kohdeaallolle on tiettyjä rajoituksia, jotka määräävät kohteen sopivan koon ja etäisyyden.

1.3 TYÖN SISÄLTÖ JA TAVOITE

Tässä työssä tutkitaan millimetrialueen radioholografian soveltuvuutta kuvaukseen. Työssä pohditaan, voiko holografialla toteutettu kuvaus yltää yhtä hyvään suorituskyykyyn kuin muut radioaaltoja käyttävät, mahdollisesti monimutkaisemmat, kuvausmenetelmät. Työ sisältää kirjallisuuskatsauksen aiemmin toteutettuihin radioaaltoja käyttäviin kuvausmenetelmiin, holografisen kuvauksen teoreettisen tarkastelun ja kokeellisen osuuden, jossa holografinen kuvaus on toteutettu 310 GHz:n taajuudella.

Luvussa 2 erilaiset radioaaltoja käyttävät kuvausmenetelmät on jaettu kahteen ryhmään, passiivisiin ja aktiivisiin kuvausmenetelmiin. Eri menetelmien teoriaa käydään lyhyesti läpi ja tyypillisiä aiemmin toteutettuja kuvausjärjestelmiä esitellään sekä niiden etuja ja haittoja pohditaan.

Luvussa 3 paneudutaan holografisen kuvauksen teoriaan sekä esitellään kuvaukseen liittyvät muuttujat ja reunaehdot. Kuvausmenetelmän teoreettista suorituskkyä arvioidaan.

Luvussa 4 käydään läpi työn kokeellinen osuus, jossa holografista kuvausta sovelletaan 310 GHz:n taajuudella. Luku sisältää kuvauksen käytetystä kuvauslaitteistosta. Kuvauslaitteistolta vaaditut referenssikentän tulokulma ja näytteistysväli apertuurilla lasketaan luvussa 3 esitetyyn teoriaan nojautuen. Lisäksi käsitellään toteutettua kuvanmuodostusalgoritmia.

Luvussa 5 toteutetun kokeellisen kuvauksen tuloksia verrataan teoreettisiin arvioihin. Holografisen kuvauksen tuloksia verrataan myös muilla kuvausmenetelmillä toteutettuihin kokeisiin, sikäli kun se on mahdollista. Saaduista kuvista pyritään määrittämään joitakin tunnuslukuja, kuten erotuskky, dynaaminen alue kuvan kirkkaudessa ja interferenssikuvion mittauksessa. Luvun lopussa arvioidaan eri keinoja lieventää epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyviä tiukkoja laitteistovaatimuksia. Myös kuvankäsittelyn vaikutusta saatujen kuvien tulkintaan arvioidaan lyhyesti.

Lopuksi pohditaan nyt tehtyyn kokeeseen perustuen, millä tavalla holografista kuvausta voidaan edelleen parantaa.

2 RADIOAALTOIHIN PERUSTUVAT KUVAAUSMENETELMÄT

Radioaalloilla on kyky tunkeutua joidenkin materiaalien läpi, ja juuri siksi ne soveltuvat käytettäväksi esimerkiksi lentokenttien turvatarkastuksissa. Vaatteissa käytetyt materiaalit ovat osittain läpinäkyviä millimetriaaltoalueella, mutta metallit ja aineet, joiden permittiivisyys on korkea, vuorovaikuttavat radioaaltojen kanssa, jolloin ne voidaan havaita ja mahdollisesti tunnistaa [6], [7].

Kuvausmenetelmät voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin. Passiivisissa menetelmissä kuvattavaa kohdetta ei valaista keinotekoisella lähteellä, vaan kuvaus perustuu kohteiden itsensä lähettämään tai ympäristöstä heijastamaan säteilyyn, jota voidaan havaita radiometrisellä mittauksella. Aktiivisissa menetelmissä kuvattavaa ympäristöä valaistetaan radioaalloilla, ja kuvaus perustuu takaisin heijastuneen säteilyn mittaamiseen. Aktiivisten menetelmien etuina passiivisiin nähden ovat suurempi dynaaminen alue ja parempi sietokyky ympäristön vaikutukselle. Aktiivisilla kuvausmenetelmillä pystytään tuottamaan monipuolisempaa tietoa tutkittavasta kohteesta kuin passiivisilla. Tutkittavan kohteen kemiallinen koostumus voidaan selvittää kohteesta saadun absorptiospektrin perusteella [6], [8] ja kuvaus voidaan fokusoida eri syvyyksille kohteella [9], [10], [11]. Toisaalta, aktiiviset menetelmät ovat usein monimutkaisempia kuin passiiviset. Passiivisessa kuvauksessa ei esiinny valaisun aikaansaamia varjostumia [12], jolloin kuvan tulkinta voi olla helpompaa kuin käytettäessä aktiivista kuvausmenetelmää.

Tässä luvussa käsitellään passiivisia ja aktiivisia kuvausmenetelmiä, joita on kehitetty ja testattu aiemmin. Holografisen kuvauksen periaate on esitetty lyhyesti luvun lopussa. Holografista kuvausta käsitellään yksityiskohtaisesti luvuissa 3, 4 ja 5.

2.1 PASSIIVISET KUVAAUSMENETELMÄT

2.1.1 KIRKKAUSLÄMPÖTILA

Passiivisissa kuvausmenetelmissä kuvan muodostus perustuu ympäristön kirkkauslämpötilan mittaamiseen. Mm. viitteiden [13], [14] mukaan, kohteen kirkkauslämpötila on se absoluuttinen lämpötila, jossa musta kappale olisi, jos sen kirkkaus vastaisi tutkittavan kohteen kirkkautta. Kirkkaus kuvaa kappaleiden säteilemää tehoa, ja sitä kuvataan Planckin lain avulla

$$B = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \left[\frac{W}{m^2 sr Hz} \right], \quad (2.1)$$

jossa h on Planckin vakio, f on taajuus, c on valonnopeus, λ on aallonpituus, k_B on Boltzmannin vakio ja T on kirkkauslämpötila. Epäyhtälö $hf \ll k_B T$ pätee käytännössä millimetriaaltoalueelle asti, jolloin Planckin lakia voidaan approksimoida Rayleigh–Jeansin lailla

$$B = \frac{2k_B T}{\lambda^2}. \quad (2.2)$$

Mustan kappaleen tapauksessa kirkkauslämpötila on sama kuin kappaleen fysikaalinen lämpötila. Todelliset kappaleet säteilevät vähemmän tehoa kuin musta kappale, ja niiden kirkkauslämpötila on aina pienempi kuin kappaleen fysikaalinen lämpötila. Samalla kappaleen kirkkaus on samassa fysikaalisessa lämpötilassa olevaa mustaa kappaletta pienempi, ja kirkkauksien suhdetta kutsutaan emissiivisyydeksi

$$\varepsilon = \frac{B}{B_M}, \quad (2.3)$$

jossa B on kappaleen kirkkaus ja B_M on mustan kappaleen kirkkaus. Emissiivisyys on aina yhtä pienempi ja kuvaa kappaleessa syntyvän tehon säteilyä sen pinnan läpi ympäröivään tilaan. Emissiivisyyden voidaan ajatella olevan eräänlainen tehon läpäisykerroin. Emissiivisyyden yhtälö (2.3) ja tekstissä seuraava kirkkauslämpötilojen käsittely pätevät vain Rayleigh-Jeansin approksimaation ollessa voimassa.

Passiivisissa kuvausmenetelmissä vastaanotettu kirkkauslämpötila ei aina vastaa kohteen itse emittoimaa säteilyä, vaan emissiivisyydestä riippuen myös kohteesta heijastunut ympäristön säteily vaikuttaa kirkkauslämpötilaan. Jos ympäristön oletetaan vastaavan mustaa kappaletta ja sen fysikaalinen lämpötila on $T_{ymp.,fys.}$ saadaan viitteiden [13], [14] mukaan kohteen havaituksi kirkkauslämpötilaksi

$$T_{k,näen.} = \varepsilon_k T_{k,fys.} + (1 - \varepsilon_k) T_{ymp.,fys.}, \quad (2.4)$$

jossa ε_k on kohteen emissiivisyys ja $T_{k,fys.}$ on kappaletta vastaavan mustan kappaleen kirkkauslämpötila, tai kappaleen fysikaalinen lämpötila. Myös tausta, jota vasten kappale on, heijastaa osan ympäristön kirkkauslämpötilasta, jolloin taustan havaittu kirkkauslämpötila on

$$T_{t,näen.} = \varepsilon_t T_{t,fys.} + (1 - \varepsilon_t) T_{ymp.,fys.}, \quad (2.5)$$

jossa ε_t on taustan emissiivisyys ja $T_{t,fys.}$ on taustan fysikaalinen lämpötila.

Kirkkauslämpötilakontrasti kuvaa, kuinka pieniä kirkkauslämpötilaeroja kohteen ja taustan välillä havaitaan, kun kohteen ja taustan näennäiset kirkkauslämpötilat ovat yhtälöiden (2.4) ja (2.5) mukaiset. Kirkkauslämpötilakontrastiksi saadaan

$$\Delta T = |T_{k,näen} - T_{t,näen}| = |\varepsilon_k T_{k,fys.} - \varepsilon_t T_{t,fys.} + (\varepsilon_t - \varepsilon_k) T_{ymp.,fys.}|. \quad (2.6)$$

Vakiolämpötilaisessa huoneessa taustan kirkkauslämpötila on lähellä taustan ja huoneen fysikaalista lämpötilaa. Silloin saadaan

$$T_{t,näen} = T_{ymp.,fys.}, \quad (2.7)$$

ja kappaleen kirkkauslämpötilaksi saadaan

$$T_{k,näen} = \varepsilon_k T_{k,fys.} + (1 - \varepsilon_k) T_{t,näen}, \quad (2.8)$$

ja kirkkauslämpötilakontrastiksi tulee

$$\Delta T = |\varepsilon_k T_{k,fys.} + (1 - \varepsilon_k) T_{ymp.,fys.} - T_{ymp.,fys.}| = \varepsilon_k |T_{k,fys.} - T_{ymp.,fys.}|. \quad (2.9)$$

Yhtälö (2.9) osoittaa, että passiivisessa kuvauksessa sisätiloissa kappale erottuu taustastaan vain, jos sen fysikaalinen lämpötila poikkeaa taustan lämpötilasta. Mikäli kappale on sisätilassa vasten taustaa, jonka lämpötila poikkeaa huoneen lämpötilasta, kontrasti taustan ja kappaleen välillä on

$$\Delta T = |\varepsilon_k T_{k,fys.} - \varepsilon_t T_{t,fys.} - (\varepsilon_k - \varepsilon_t) T_{ymp.,fys.}|. \quad (2.10)$$

Nyt kappale erottuu taustaa vasten riippumatta siitä ovatko kappaleen ja taustan lämpötilat samat (olettaen, että kappaleen ja taustan emissiivisyydet poikkeavat toisistaan, eli käytännössä ovat eri materiaalia). Passiivinen kuvaus voidaan ajatella aktiiviseksi, kun taustan lämpötilaa käytetään hyväksi kirkkauslämpötilakontrastin kasvattamiseksi.

Ulkotilassa tapahtuvassa kuvauksessa taustan kirkkauslämpötila on yhtälön (2.5) mukainen, jossa ympäristön fysikaalinen lämpötila on ilmakehän ja avaruuden kylmä kohinalämpötila. Kohteen kirkkauslämpötila on yhtälön (2.4) mukainen, jossa ympäristön lämpötila voi olla tilanteesta riippuen kylmän taivaan tai lämpimämmän maan lämpötila. Kontrastiksi saadaan

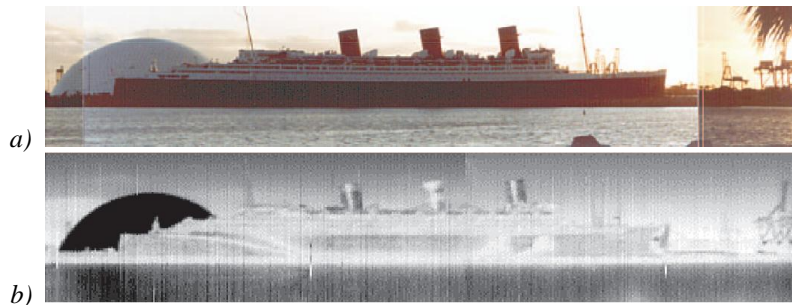
$$\begin{aligned} \Delta T &= |\varepsilon_k T_{k,fys.} - \varepsilon_t T_{t,fys.} + (1 - \varepsilon_k) T_{ymp.,fys.} - (1 - \varepsilon_t) T_{taivas,fys.}| \\ &= \varepsilon_k (T_{k,fys.} - T_{ymp.,fys.}) - \varepsilon_t (T_{t,fys.} - T_{taivas,fys.}) + T_{ymp.,fys.} - T_{taivas,fys.}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Ulkotilassa kirkkauslämpötilakontrasti voi siis vaihdella huomattavasti; kontrasti voi olla jopa maan (300 K) ja taivaan (< 10 K) kirkkauslämpötilan erotuksen suuruinen.

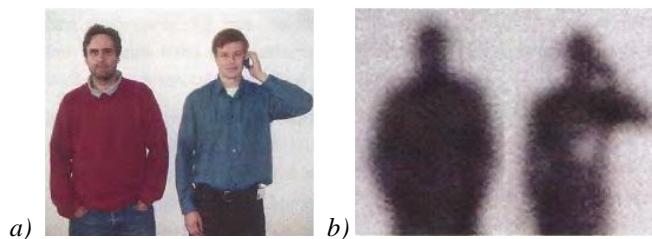
Kuten (2.4) osoittaa, havaittu kirkkauslämpötila voi riippua voimakkaasti ympäristön kirkkauslämpötilasta, mikäli emissiivisyys on hyvin pieni tai ympäristön kirkkauslämpötila on hyvin korkea. Passiivisia kuvausmenetelmiä käytettäessä joudutaankin usein kontrolloimaan käyttöympäristön lämpötilaa, asentamaan vakiolämpöisiä taustaseiniä ja suorittamaan kalibrointeja taajaan [14]. Ympäristön kirkkauslämpötilan vaikutus

kuvaukseen voi olla myös etu, sillä kohteet, joiden emissiivisyys on pieni, voivat olla paremmin havaittavissa niistä heijastuneen ympäristön säteilyn ansiosta [7], [14]. Etu on saavutettavissa parhaiten ulkona tapahtuvassa kuvauksessa, sillä taivaan kylmä kirkkauslämpötila luo suuren kirkkauslämpötilaeron esimerkiksi metallikappaleiden ja mustaa kappaletta muistuttavan ympäristön (vaikkapa maa-aines) välille. Metallikappale voidaan tällöin erottaa taustastaan, vaikka ne olisivatkin samassa lämpötilassa.

Kuvissa 2.1 ja 2.2 on esitetty sisä- ja ulkotiloissa otettuja millimetriaaltokuvia. Kuvassa 2.1 b taivaan kylmä kirkkauslämpötila heijastuu laivan takana olevasta metallikupolista, joka on siten selkeästi erotettavissa. Laivan kyljet erottuvat huonosti, sillä niistä heijastunut kohinalämpötila vastaa ympäristön lämpötilaa. Sisätiloissa otetussa millimetri-aaltokuvassa 2.2 b on paljon vähemmän yksityiskohtia: kuvattavista henkilöistä nähdään vain silhuetit. Kuvassa oikealla olevalla henkilöllä on käsiasetta kuvaava metallikappale piilotettuna paidan alle. Kappale näkyy millimetriaaltokuvassa, sillä se heijastaa ympäristön kohinalämpötilaa. Kappaleen yksityiskohtia ei voi kuitenkaan tunnistaa. Kuvanlaatua voidaan parantaa valaisemalla kuvattavaa kohdetta millimetriaaltolähteellä, jolloin kappaleet, joilla on pieni emissiivisyys erottuvat paremmin.



Kuva 2.1. a) valokuva ja b) passiivinen millimetriaaltokuva ulkotiloissa [7].



Kuva 2.2. a) valokuva ja b) passiivinen millimetriaaltokuva sisätiloissa [14].

2.1.2 RADIOMETRIT JA ILMAISIMET

Kohteen kirkkauslämpötilaa mitataan radiometrillä, joka on herkkä ja laajakaistainen radiovastaanotin. Käytetyimmät radiometrityypit ovat kokonaisteho-, Dicke- ja kohinainjektioradiometrit. Kokonaistehoradiometri on yksinkertaisin radiometrityyppi, ja sen toiminta perustuu vastaanotetun tehon integrointiin tietyllä integrointijaksolla. Kokonaistehoradiometriltä saatu mittausarvo on siten jakson aikana kertynyt teho. Kokonaistehoradiometrin vastaanotin voi olla heterodyne-tyyppinen, jolloin vastaanotettu

signaali vahvistetaan ja sekoitetaan matalammalle välitaajuudelle, jossa sitä mahdollisesti vahvistetaan edelleen ennen ilmaisua diodilla. Kokonaistehoradiometrin vahvistinten tulee olla tarkasti kalibroidut, jotta kohinalämpötila saadaan mitattua tarkasti. Vahvistimien vahvistuksen vaihtelu voi olla niin nopeaa, että radiometriä tulisi kalibroida integrointijaksonkin aikana, jotta saataisiin riittävän tarkka kohinalämpötilan mittausta. Dicke-radiometrissä integrointijakso on jaettu kahtia: yhden jaksonpuolikkaan aikana mitataan kohteen kirkkauslämpötilaa ja toisen puolikkaan aikana mitataan kohinalähdettä, jonka kirkkauslämpötila on tunnettu. Vertaamalla molempia kirkkauslämpötiloja laitteiston vaikutus tulokseen voidaan poistaa. Koska Dicke-radiometrissä puolet ajasta käytetään kalibrointiin, tarvitaan kaksinkertainen integrointiaika ideaaliseen kokonaistehoradiometriin nähden, mikäli halutaan saavuttaa sama kirkkauslämpötilaerotuskyky. Kohinainjektioradiometrissä vahvistuksen vaihtelun vaikutus mittaustulokseen poistetaan syöttämällä radiometrin antennihaaraan lisäkohinaa siten, että radiometrin antama kirkkauslämpötila on aina vakion vertailukohinalähteen suuruinen. Lisätty kohinateho tunnetaan, jolloin saadaan myös todellinen kohteen kirkkauslämpötila. Kohinainjektioradiometrin kirkkauslämpötilaerotuskyky on yhtä suuri kuin Dicke-radiometrissä. Radiometrin mittaama signaali on kohinaluontoista, joten radiometrin tulee itse olla mahdollisimman vähäkohinainen. Dicke-radiometri on suosituin radiometrityyppi stabiiliuden, vähäkohinaisuuden ja suhteellisen yksinkertaisen rakenteensa ansiosta. Erilaisia passiiviseen kuvaukseen soveltuvia radiometrejä käsitellään enemmän viitteissä [7], [13], [14].

2.1.3 ANTENNIT

Heterodyne-periaatteella toimivat radiometrit ovat suhteellisen kookkaita, ja usein käytetäänkin vain yhtä tai muutamaa vastaanotinta, jotka suunnataan kutakin kuvan kuvapistettä vastaavaan kohtaan kohteella [7], [14], tai joiden antennikeilaa ohjataan ulkoisella, liikkuvalla peilillä [15], [16]. Radiometrin antenni voidaan fokusoida kuvattavan kohteen etäisyydelle peiliheijastimella tai linssillä [14], [15]. Linssi voidaan asentaa radiometriin kiinteästi, jolloin radiometrikin liikkuu suuntauksen aikana. Peili voi liikkua erillään radiometrissä, jolloin antennikeilan suuntaus voi olla nopeampaa. Radiometrin keilaa voidaan kääntää myös sähkö-optisilla tai akusto-optisilla hiloilla, joissa materiaalin taitekerrointa moduloidaan siinä kulkevalla sähkömagneettisella tai akustisella aallolla [15]. Jos käytetään tasomaista peiliä, sähkö- tai akusto-optista hilaa, radiometrin antennissa käytetään linssiä fokusoidaan radiometrin antennikeila kohteen etäisyydelle. Käytettäessä ohjattavaa antennikeilaa kuvanmuodostukseen, saavutettavissa oleva erotuskyky riippuu suoraan antennin apertuurin koosta, ja on heijastin- ja linssiantennille

$$\theta_{3dB} \approx 70^\circ \frac{\lambda}{D_{ant}}, \quad (2.12)$$

jossa θ_{3dB} on antennin pääkeilan puolen tehon leveys asteina, $D_{ant.}$ on antennin halkaisija ja λ on aallonpituus. Koska vastaanotettava signaali on laajakaistaista, erotuskyky määräytyy käytettävän kaistan matalimman taajuuden mukaan. Erotuskyvyn voidaan ajatella määräytyvän myös efektiivisen taajuuden perusteella [17], [18]. Efektiivinen taajuus voidaan selvittää vertaamalla kohteen reunan aiheuttamia muutoksia mitattuun millimetriaaltokuvaan ja eri taajuuksilla simuloituihin millimetriaaltokuviin. Kun reunan aiheuttama muutos mitatussa kuvassa vastaa simuloitua, on efektiivinen taajuus se, jolla simulointi tehtiin. Efektiivinen taajuus on korkeampi kuin mitatun laajakaistaisen signaalin matalin taajuus, jolloin myös saavutettu efektiivinen erotuskyky on suurempi kuin määriteltäessä erotuskyky taajuuskaistan matalimman taajuuden mukaan.

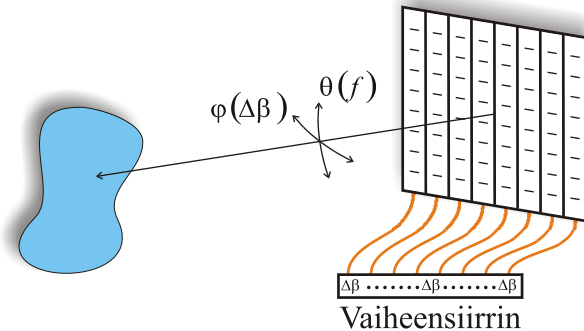
Viitteessä [14] on esitelty 92–96 GHz:n passiivinen kuvauslaitteisto, jossa käytetään linssiä fokusoivana elementtinä. Linssin halkaisija on 30 cm, ja se on fokusoitu kohteeseen 2 m:n etäisyydelle. Linssinpolttopisteessä on torviantenni, ja linssi-torvi -järjestelmän keilanleveydet ovat 0,7° ja 0,8° E- ja H-tasoissa (erotuskyky 1,5 m:n päässä linssistä on noin 2 cm). Vastaanottimena käytetyn Dicke-radiometrin kirkkauslämpötilaerotuskyky on 20 ms:n integrointiajalla noin 0,2 K, mutta käytännössä koko laitteiston erotuskyky on 1 K. Kuvanmuodostus toteutetaan kääntämällä antennia mekaanisesti, jolloin kuvanmuodostamiseen käytetty aika on tyypillisesti 10–35 minuuttia. Kuva 2.2 b on otettu yllä mainitulla laitteistolla.

Radiometrien antenneista voidaan myös muodostaa ryhmä, jonka pääkeilan suuntaa voidaan ohjata sähköisesti. Antenniryhmän muodostaman säteilykuvion keilanleveys on ryhmän yksittäisen elementin keilanleveyttä kapeampi, jolloin yksittäisen elementin leveä keila voidaan kompensoida elementtien lukumäärää kasvattamalla.

Sähköisen keilanohjauksen haittana on kuitenkin vaatimus laajakaistaaisuudesta radiometrin herkkyyden lisäämiseksi ja toisaalta radiometrien määrä, joka voi kasvaa suureksi vaadittavan erotuskyvyn saamiseksi. Antenniryhmistä voi olla vaikea tehdä laajakaistaista, sillä signaalireittien sähköinen pituus riippuu taajuudesta, jolloin tietyllä taajuudelle viritetty ryhmä ei enää toimi kunnolla muilla taajuuksilla.

Viitteessä [19] on esitetty sähköisesti ohjattavaan antenniryhmään perustuva 76–94 GHz:n kuvauslaitteisto, joka kykenee 30 Hz:n videotaajuiseen ruudunpäivitykseen. Tässä tapauksessa antennirakenteen sähköisen pituuden muuttumista taajuuden mukana käytetään hyväksi, sillä antenniryhmän muodostavat vierekkäin asetetut mikroliuskatekniikalla toteutetut rakoantenniryhmät (elementit), joiden muodostaman pääkeilan suunta muuttuu taajuuden muuttuessa. Muuttuvalla taajuudella siis ohjataan kuvauslaitteen keilaa elevaatio-suunnassa. Atsimuuttisuuntainen keilanohtaus toteutetaan vaiheensiirtimillä, joiden avulla antenniryhmän eri elementtejä (yksi rakoantenniryhmä muodostaa nyt elementin) vaiheistetaan sopivasti. Kuvauslaitteiston apertuuri on kooltaan 60 x 60 cm², ja antenniryhmän muodostaman keilan leveys on 0,3° (erotuskyky 1,5 m päässä apertuurista on 0,8 cm). Kuvauslaitteen näkökenttä on 30° x 20°, ja saadussa millimetriaaltokuvassa on

192 x 128 kuvapistettä. MMIC (*monolithic microwave integrated circuit*) -tekniikalla toteutettujen radiometrien kirkkauslämpötilaerotuskyky on 5 K käytettäessä 30 Hz:n ruudunpäivitystä. Kuvassa 2.3 on havainnollistettu sähköisen viitteessä [19] esitetyn sähköisen keilanojauksen toimintaa.



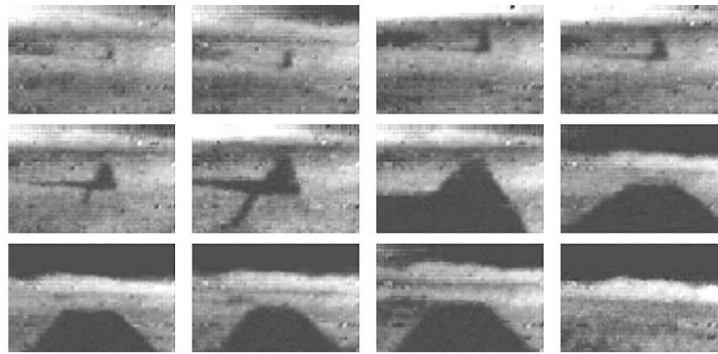
Kuva 2.3. Sähköiseen keilanojaukseen perustuva passiivinen kuvaus [19]. Pääkeilan suuntaa ohjataan vierekkäisillä lineaarisilla rakoantenniryhmillä. Atsimuuttisuuntainen ohjaus toteutetaan vaiheistamalla eri rakoantenniryhmiä sopivasti ja elevaatio-suuntainen ohjaus saadaan muuttamalla taajuutta.

Keilanojauks voidaan tehdä myös digitaalisesti. Tällöin radiometriyhmän kunkin vastaanottimen signaali tallennetaan, ja tallennettuja signaaleja käsitellään tietokoneella joko lähes reaaliajassa tai vasta mittaustapahtuman jälkeen, riippuen mm. siitä, halutaanko videotaajuista kuvanpäivitystä. Viitteessä [20] on esitetty digitaaliseen keilanmuodostukseen perustuva passiivinen kuvausmenetelmä, jossa tarvittavien heterodyne-radiometrien lukumäärä pyritään minimoimaan optimoimalla ryhmän geometriaa.

Passiivinen kuvaus voidaan toteuttaa käyttämällä useita radiometrejä, jotka on asennettu dielektrisen linssin polttotasolle, jolloin kukin vastaanotin vastaa yhtä kuvapistettä [7], [14], [17]. Rakenteen haasteena on suuri määrä radiometrejä, joiden täytyy mahtua pieneen tilaan ja joiden välinen kytkentä on saatava mahdollisimman pieneksi. Heterodyne-vastaanottimen sijasta voidaan käyttää yksinkertaisempaa suoran ilmaisun vastaanotinta, jossa ilmaisu tapahtuu suoraan ensimmäisen vahvistusasteen jälkeen ilmaisindiodilla. Radiometrin sijaan voidaan käyttää myös bolometriä [4], [21], jonka resistanssi riippuu lämpötilasta. Säteilytehoa absorboiva bolometrin pinta saa aikaan lämpötilan muutoksen komponentissa, jolloin kohteen kirkkauslämpötila saadaan selville resistanssimittauksella. Bolometrit ovat herkkiä käyttöympäristön lämpötilan muutoksille, ja ne ovat kohinaisia huoneenlämpötilassa [3]. Bolometrit voivat olla huoneenlämpötilassa liian epäherkkiä ja kohinaisia käytettäväksi passiivisissa kuvausmenetelmissä, varsinkin sisätiloissa, jossa kohteiden välinen kontrasti on pieni. Herkkyyden lisäämiseksi bolometrit täytyy jäähdyttää hyvin alhaiseen lämpötilaan. Jäähdytettynä bolometrien kirkkauslämpötilaerotuskyky voi olla 125 mK (heterodyne-radiometrillä ~ 500–1000 mK), kun ilmaisukaista on 0,1–1,0 THz ja integrointiaika on 30 ms [18]. Bolometrien etuna muihin ilmaisumenetelmiin nähden on niiden laajakaistaisuus, jolloin kohteen lähettämää kohinatehoa voidaan vastaanottaa taajuuskaistalta, joka kattaa koko millimetriaalto- ja alimillimetriaaltoalueen [16]. Suuri

bolometriryhmä voidaan myös valmistaa suhteellisen edullisesti. Linssin tai peilin polttotasolle asennetun radiometri- tai bolometriryhmän etuna on mahdollisuus reaaliaikaiseen kuvaamiseen, sillä radiometrin integrointijakson pituus voi olla 10 ms, joka riittää hyvin videotaajuiseen kuvanpäivitykseen.

Yllä kuvatun mukainen linssin polttotasolle asetettuun radiometriryhmään perustuva W-alueen (75–111 GHz) kuvauslaitteisto on esitetty viitteessä [17]. Radiometriryhmässä on 1040 erillistä suoran ilmaisen radiometriä, jotka on asetettu 46 cm dielektrisen linssin polttotasolle. Radiometrit on koottu 26 riviin 40 vastaanottimen lineaarisina ryhminä. Radiometrien koko on saatu pieneksi käyttäen MMIC -tekniikkaa niiden valmistamisessa. Kuvauslaitteiston näkökenttä on $15^\circ \times 10^\circ$, ja sen kulmaerotuskyky on $0,3^\circ$ (1,5 m etäisyydellä apertuurista erotuskyky on 1 cm). Käytettyjen radiometrien kirkkauslämpötilaerotuskyky on 10 ms integrointiajalla 400 mK. Käytettäessä videotaajuisia kuvausta (ruudunpäivitys 17 Hz), koko laitteiston kirkkauslämpötilaerotuskyky heikkenee 2 K:iin. Kuvassa 2.4 on esitetty kuvasarja, joka on poimittu videotaajuisesta kuvavirrasta kun kuvauslaitteisto oli asennettuna lentokoneeseen.



Kuva 2.4. Kuvasarja videotaajuisesta passiivisesta kuvauksesta. Käytetty kuvauslaitteisto perustuu linssin polttotasolle asennettuun vastaanotinryhmään [17].

Kuvassa 2.4 lentokone lentää kiitoradan yli. Kiitorata näyttää tummalta, sillä se heijastaa ympäröivää maata paremmin taivaan kylmää kirkkauslämpötilaa; samasta syystä taivas näyttää tummalta kirkkauslämpötilakuvassa.

2.2 AKTIIVISET KUVAAUSMENETELMÄT

Aktiivisessa kuvauksessa kuvan muodostus perustuu valaistun kohteen sirottaman tehon mittaamiseen ja siroavan kentän rekonstruointiin kuvattavan kohteen pinnalle. Samoin kuin passiivisissa kuvausmenetelmissä, kuva muodostetaan joko suuntaamalla vastaanottimen antennikeila kutakin kuvapistettä vastaavaan kohtaan kohteella, [22], [23], [24], asettamalla vastaanotinryhmä linssin tai peilin polttotasolle [4] tai käyttämällä pelkkää vastaanotinryhmää, mm. viitteissä [9], [10], [11], [24], [25], jolloin kuva fokusoidaan laskennallisilla menetelmin. Kuvaus perustuu kohteelta heijastuneeseen sähkökenttään

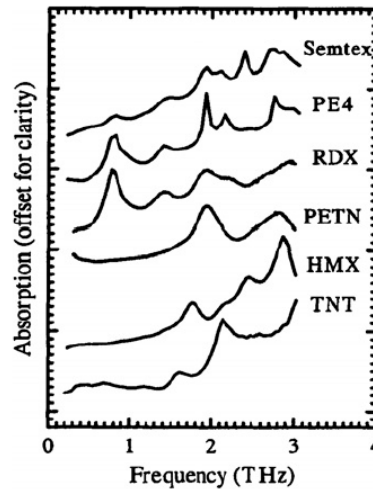
$$E_{heij.}(x, y, z, f) = R_{kohde}(x, y, z, f)E_{valaisu}(x, y, z, f), \quad (2.13)$$

jossa $E_{heij.}$ ja $E_{valaisu}$ ovat kohteesta heijastunut ja kohdetta valaiseva sähkökenttä, f on taajuus ja R_{kohde} on kohteen pinnan heijastuskerroin. Taajuus f on merkitty yhtälöön (2.13) korostamaan kohteen heijastuskertoimen muuttumista taajuuden mukana, mikä mahdollistaa materiaalien luokittelun niille ominaisen absorption perusteella. Mikäli heijastuneesta kentästä tunnetaan myös vaihe, saadaan kompleksinen heijastuskerroin, mikä voi mahdollistaa osaltaan materiaalien luokittelun myös yksittäisellä taajuudella [26].

Useimmiten kohteesta saatu heijastavuuskartta esitetään 2-ulotteisena kuvana (z -koordinaatti on vakio z_k yhtälössä (2.13)). Poikkeuksena ovat laajakaistaiset holografiset kuvausmenetelmät ja stereoskooppiset menetelmät, jolloin kuvattavasta kohteesta saadaan tietoa myös syvyys suunnassa [9], [10], [11], [27]. Stereoskooppisessa holografisessa kuvauksessa käytetään kahta referenssikenttää, joiden avulla kohteesta saadaan kaksi holografista kuvaa. Kolmiulotteinen esitys tutkittavasta kohteesta saadaan yhdistämällä kaksi kuvaa. Jos kentän sekä amplitudi että vaihe tunnetaan, kuvausjärjestelmä voidaan fokusoida halutulle etäisyydelle tai haluttuun suuntaan sähköisesti ilman, että kuvausjärjestelmää täytyy mekaanisesti liikuttaa.

Kohdetta valaistetaan lähettimellä, joka usein on vaihelukittu vastaanottimen kanssa, jolloin järjestelmän sanotaan olevan koherentti. Valaisussa voidaan käyttää myös kohinalähteitä [4], jolloin järjestelmä on siis epäkoherentti. Kohinalähteitä käytetään yleensä, kun halutaan kasvattaa sisätiloissa käytetyn passiivisen kuvausmenetelmän antamaa kontrastia. Kohinalähteen voidaan käyttää radiolähettimen kaltaista lähdettä, tai vaikkapa tiettyyn lämpötilaan lämmitettyä seinää, joka luo kirkkaan taustan kohteelle [14]. Epäkoherentti järjestelmä on tehon mittaukseen perustuva, joten sillä saadaan vähemmän tietoa kuvattavasta kohteesta kuin koherentilla järjestelmällä. Tunnistettaessa materiaaleja niiden absorptiospektrien perusteella, vaaditaan järjestelmä, jonka taajuutta voidaan muuttaa laajalla alueella, mutta jonka hetkellinen kaistanleveys on pieni. Passiivisissa järjestelmissä kaistanleveys on suuri, joten eri spektrikomponenttien havaitseminen on vaikeaa. Passiivisessa kuvauksessa on ehdotettu käytettävän taajuusselektiivisiä pintoja [28], joiden avulla radiometrinen mittaaminen voidaan kohdistaa vain tietylle, kapealle taajuuskaistalle. Aktiivisen kuvauksen etuna on keinotekoisien valaisun luoma kohtuullisen suuri teho, joka siroaa kohteelta vastaanottimeen. Vastaanotettava signaali on siten helposti paljon voimakkaampi kuin passiivisessa kuvauksessa mitattava kohteen kirkkauslämpötila.

Kohteen valaisu voidaan toteuttaa pulssitetulla tai jatkuvan toiminnan (CW, *continuous wave*) lähettimellä. Valaisun, joka perustuu hyvin lyhyisiin pulsseihin, etuna on mahdollisuus saada tietoa kohteesta hyvin laajalta taajuuskaistalta. Ajallisesti lyhyen pulssin spektri taajuusalueessa on leveä. Kun kohteelta heijastunut pulssi Fourier-muunnetaan, saadaan spektri, joka on moduloitunut taajuuden mukana muuttuvan kohteen heijastuskertoimen mukaisesti [6]. Menetelmää kutsutaan aika-alueen spektroskopiaksi. Kuvassa 2.5 on esitetty joidenkin aineiden absorptiospektrejä taajuuden funktiona [29].

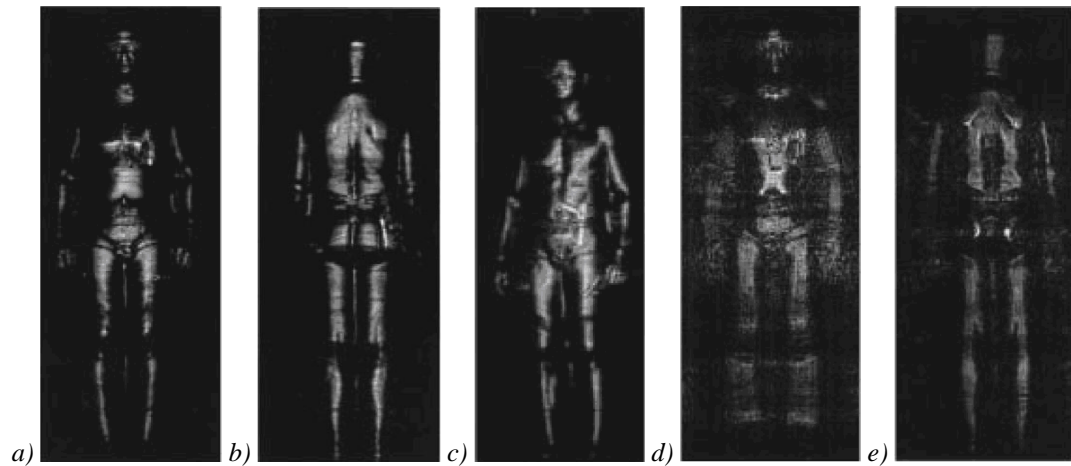


Kuva 2.5. Eri aineiden absorptiospektrejä [29].

Pulssitettu valaisu mahdollistaa kohteiden kuvaamisen myös syvyysuunnassa, jolloin käytetään hyväksi pulssin kulkuaikaa kohteelta vastaanottimeen. Toinen lähestymistapa kolmiulotteiseen kuvaamiseen on käyttää Fourier-tekniikkaa, jossa kohteelta tulevan laajakaistaisen pulssin muodostama kenttä muunnetaan 3-dimensioiseen muotoon kohteen luona. Menetelmässä kenttä mitataan kahdessa dimensiossa, ja kolmas dimensio saadaan käyttämällä tietoa kentästä eri taajuuksilla [9], [10], [11]. Pulssin sijaan laajakaistaisuus voidaan toteuttaa jatkuvalla aaltomuodolla, jonka taajuus on pyyhkäistävissä. Kuvissa 2.6 a–c on esitetty jatkuvaan valaisuun ja taajuuspyyhkäisyyn (27–33 GHz) perustuvalla menetelmällä [9] otettuja kuvia. Vertailun vuoksi kuvissa 2.6 d ja e on esitetty myös pistetaajuudella otetut millimetriaaltokuvat. Verrattaessa pistetaajuudella toimivaan menetelmään, kuvien laadussa huomataan selvää parannusta kun käytetään laajakaistaista menetelmää. Viitteen [9] Fourier-tekniikkaa hyödyntävässä laajakaistaisessa kuvausmenetelmässä saavutettavissa oleva syvyysuuntainen erotuskyky on

$$\Delta\delta_z = \frac{c}{2B}, \quad (2.14)$$

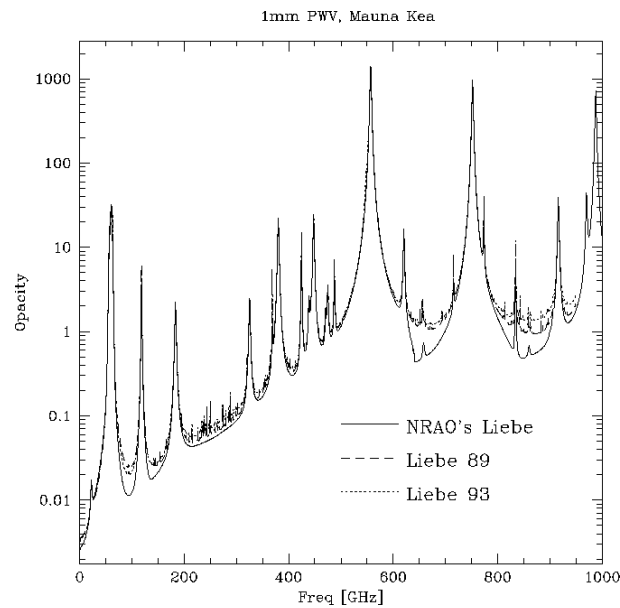
jossa c on valonnopeus ja B on pyyhkäistävän kaistan leveys. Laajakaistaisen kuvausmenetelmän kulmaerotuskyky saadaan yhtälöstä (2.12). Viitteessä [9] esitellyn kuvauslaitteiston poikittaista erotuskykyä ei ole raportoitu, mutta kuvista 2.6 a–c arvioituna erotuskyky on luokkaa 1 cm. Kuvassa 2.6 c erottuvat paidan alle piilotettu ja henkilön kädessään pitämät aseet. Syvyysuunnassa erotuskyky on yhtälön (2.14) mukaan 2,5 cm. Kohteen etäisyyttä kuvauslaitteiston apertuurista ei ole ilmoitettu, mutta viitteestä [9] voidaan päätellä etäisyyden olevan metrin luokkaa tai pienempi. Fourier-tekniikkaan perustuvaa kuvausta käsitellään enemmän luvussa 3.



Kuva 2.6. *Fourier – tekniikalla otettu millimetriaaltokuva ihmisestä taajuudella 27–33 GHz [9]. Kuvissa a) ja b) nähdään millimetriaaltokuva, kun käytetään laajakaistaista mittausta. Kuvassa c) henkilö kantaa asetta lantiollaan ja kädessään. Kuvat d) ja e) on otettu pistetaajuudella.*

Jatkuvan valaisun menetelmällä lähetetty teho ei leviää taajuusalueessa, jolloin voidaan vastaanottaa suurempaa tehoa tietyllä taajuudella kuin pulssitetun valaisun tapauksessa. Laajakaistaisella jatkuvan valaisun järjestelmällä kohteen absorptiospektrin tutkiminen on mahdollista. Jatkuvalla valaisulla ei kuitenkaan ole helppoa kattaa yhtä leveää kaistaa kuin pulssitetulla valaisulla. Jatkuvalla valaisulla on etuna kapea hetkellinen kaistanleveys, jolloin on mahdollista erottaa kapeampia yksityiskohtia tutkittavan kohteen absorptiospektristä kuin pulssitetulla valaisulla [6]. Jos kuvattava kohde on kaukana kuvausjärjestelmästä, ilmakehän vaimennus vaikuttaa eri taajuuksien signaalien etenemiseen eri tavalla, jolloin itse kohteen absorptiospektrin tutkiminen voi olla mahdotonta. Kuvassa 2.7 on esitetty ilmakehän läpinäkyvyyttä 1000 GHz:iin asti [30]. Ilmakehän vaimennus L_{atm} saadaan läpinäkyvyydestä: $L_{atm} = e^{-\alpha z}$, jossa α on opasiteetti ja z matka, jonka säteily kulkee ilmakehässä. Ilmakehän vaikutus on voimakasta erityisesti alimillimetriaaltoalueella, jolloin ilmakehän vaimennus voi olla jopa 30 dB/m.

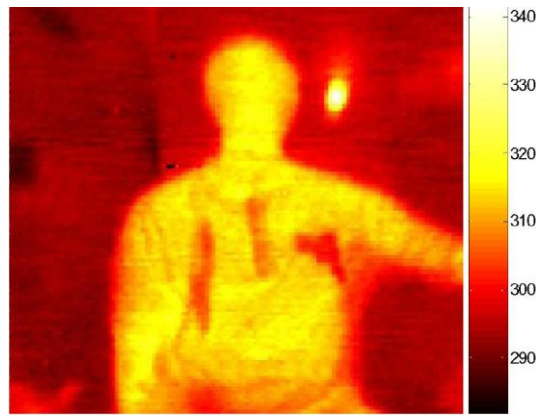
Kuvanmuodostus aktiivisissa menetelmissä perustuu joko vastaanottimen antennikeilan skannaamiseen tai sähkökentän mittaamiseen tietyllä pinnalla, jolle kuva kohteesta on mahdollisesti fokusoitu peilin tai linssin avulla. On osoitettu, että suurin signaali-kohina-suhde on saavutettavissa, kun kuva muodostetaan pyyhkimällä vastaanottimen antennikeilaa kohteen yli siten, että kohdetta myös valaistaan vain kuvapistettä vastaavalta alueelta kerrallaan [31]. Tällä tavoin valaisuteho keskittyy vain sillä hetkellä kuvattavalle alueelle, ja saadaan suurin mahdollinen takaisin heijastunut signaali. Menetelmän haasteena on saada lähettimen ja vastaanottimen antennikeilat yhdistettyä mahdollisesti nopeassa pyyhkäisyssä tutkittavan kohteen yli. Mikäli tavoitteena on saada lähes reaaliaikaista kuvaa, pyyhkäisy on tehtävä sähköisesti.



Kuva 2.7. Ilmakehän läpinäkyvyyttä $[m^{-1}]$ [30].

Verrattuna vaikkapa linssin polttotasolle asetettuun bolometriryhmään, sähköinen pyyhkäisy on monimutkaisempaa toteuttaa. Sähköisessä pyyhkäisyssä tarvitaan aina kytkentäelektroniikkaa, joka vaihtelee vastaanotinryhmää sopivan antennikeilan muodostamiseksi. Bolometri on epäkoherentti ilmaisim, jolloin heterodyne-vastaanottimen tekniikkaa ei vaadita, vaan signaalin luku ilmaisimelta vaatii ainoastaan yksinkertaisempaa audiotaaajuista resistanssin mittausta [4]. Toisaalta, koherentin vastaanoton edut menetetään, eikä bolometriä voida käyttää esimerkiksi sähköiseen keilanojaukseen perustuvissa menetelmissä. Kuvassa 2.8 on bolometriin perustuvan passiivisen kuvausmenetelmän tuottama kuva [21], [32]. Bolometrien laajakaistaisuuden takia kuvan kirkkauslämpötila saadaan 0,1–1000 GHz:n kaistalta. Käytetty integrointiaika oli 10 ms, jolloin bolometrin kirkkauslämpötilaerotuskyky oli 125 mK. Lopullisessa kuvassa kirkkauslämpötilaerotuskyky oli 200 mK. Kuvanmuodostukseen käytettiin 30 cm:n läpimittaista pallomaista heijastinantennia, joka suunnattiin mekaanisesti jokaista kuvapistettä vastaavaan kohtaan kohteella. Kuvanmuodostamiseen tarvittava aika oli noin 20 minuuttia. Kuvan erotuskyky on alle 1 cm. Kuvassa erottuu henkilön paidan alle piilotettu keraaminen veitsi sekä käsiase.

Bolometrejä on käytetty myös aktiivisessa kuvauksessa [4], jossa kuva kohteesta fokusoitiin ryhmälle parabolisen peilin avulla ja kohdetta valaistiin eri suunnista kolmella kohinalähteellä.



Kuva 2.8. Bolometrin avulla muodostettu kuva taajuudella 0,1–1000 GHz [32]. Kuvassa olevalla henkilöllä on veitsi (vasemmalla) ja käsiase (oikealla) piilotettuna paidan alle. Keskellä oleva yksityiskohta, joka muodostuu paidassa olevasta paksummasta kohdasta.

2.2.1 HOLOGRAFINEN KUVAAUS

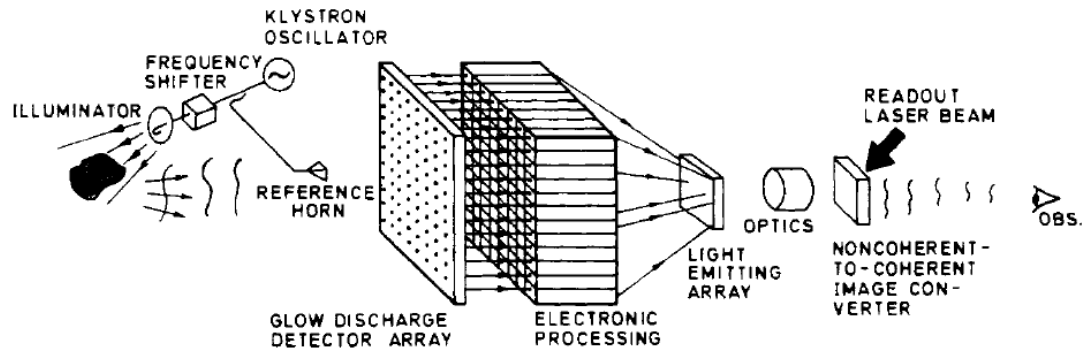
Useimmat edellä esitellyt kuvausmenetelmät perustuvat heijastuneen tai emittoidun sähkökentän mittaamiseen suoraan kohteen luona käyttäen apuna fokusoivia elementtejä tai sähköistä keilanohtausta. Kuten myöhemmin esitetään luvussa 3, tietyllä tasolla mitattu sähkökenttä voidaan Fourier-muunnoksen avulla palauttaa mille tahansa muulle tasolle, tässä tapauksessa kuvausjärjestelmän apertuurilta kohteen luo. Tällainen kuvaus vastaa sähköistä keilanohtausta; tarvittavat vaihteensierot vastaanotetuille signaaleille tehdään nyt vain laskennallisesti, jolloin kerran mitatun kentän perusteella kuvausjärjestelmä voidaan fokusoida useille etäisyyksille. Näin saadaan järjestelmä, joka on joustavampi kuin konkreettinen keilanohtaus. Käytettäessä laskennallista fokusointia, riittää, että vastaanottimista on muodostettu riittävän tiheä ryhmä, joka täyttää kuvausjärjestelmän apertuurin. Nyt kullakin vastaanottimella on oma antenninsa, joita ei kuitenkaan tarvitse fokusoida tietylle etäisyydelle kohteen luo. Menetelmää kutsutaan kirjallisuudessa holografiseksi kuvaukseksi. Holografinen menetelmä soveltuu lähes reaaliaikaiseen kuvaukseen, sillä siinä ei ole liikkuvia osia, vaan järjestelmän nopeus riippuu eniten vastaanotetun signaalin mittauksen ja tallentamisen sekä kuvanmuodostukseen liittyvän laskennallisen vaiheen nopeudesta. Kuten muissakin kuvausmenetelmissä, holografisen kuvauksen haittana on huono tarkennus kuvattaessa syviä kohteita, mikäli käytetään vain yhtä taajuutta. Lisäksi holografisessa kuvauksessa vaaditaan koherenttia vastaanottoa. Kuvassa 2.6 a–e esitetyt millimetriaaltokuvat on otettu holografisella menetelmällä [9], mutta juuri koherenttien vastaanottimien suuri koko estää lukuisten (65000) vastaanottimien asentamisen apertuurin ($72 \times 200 \text{ cm}^2$) alueelle, jolloin joudutaan käyttämään liikutettavaa lineaarista vastaanotinryhmää. Myös kohteen valaisuun käytetyt lähetimet sijaitsevat vastaanotinryhmän kanssa samassa lineaarisessa ryhmässä. Käyttämällä erityistä vastaanotinten ja lähettimien vuorottelevaa kytkentää, saadaan vastaanottimien määrää edelleen vähennettyä lineaarisessa ryhmässä, jolloin kentän näytenäköksi saadaan puolet todellisesta vastaanotinten välisestä etäisyydestä. Mekaanisen

liikkeen takia kuvauslaitteen käyttämä aika kuvanmuodostukseen on noin 1 sekunti, johon tulee lisäksi tietokoneen tarvitsema laskenta-aika. Viitteessä [9] (1998) laskenta-ajaksi ilmoitetaan 10 s.

Holografiseen kuvaukseen läheisesti liittyvä kuvausmenetelmä on interferometrinen kuvaus [6], [33], [34], jossa joukko vastaanottimia on sijoitettu apertuurille. Vastaanottimista valitaan pari, joiden vastaanottamat signaalit viivästetään sopivasti ja korreloidaan keskenään. Kun parin vastaanottimien välinen etäisyys tunnetaan, saadaan selville vastaanottimille tulleen signaalin tulosuunta. Yhden vastaanotinparin avulla voidaan tunnistaa yksi suunta, josta kohteelta heijastunut kenttä tulee; kuvapisteidien lukumäärä lopullisessa kuvassa on vastaanotinparien lukumäärä. Interferometrisessä kuvauksessa halutaan kattaa tietty avaruuskulma (näkökenttä), joista tuleva heijastunut kenttä tulee apertuurille. Koska näkökenttä halutaan kattaa mahdollisimman tehokkaasti, on eri vastaanotinparien sijaittava toisiinsa nähden eri tavalla. Kun vastaanotinten sijainti apertuurilla valitaan siten, että kaikkien parien yhdysjana on eripituinen ja – suuntainen, saadaan N_i vastaanottimella kuva, jossa on $N_i(N_i - 1)/2$ kuvapistettä. Tällaisen ei-redundantisella vastaanotinjoukolla toteutetun kuvauslaitteen kuvanlaatu riippuu voimakkaasti vastaanottimien sijoittelusta: vastaanottimet on järjesteltävä apertuurille siten, että ei-redundantisuus säilyy, mutta silti siten, että kuvauslaitteen näkökenttä täyttyy mahdollisimman tasaisesti kuvapisteistä. Interferometrisen kuvauksen etuna on pieni määrä vastaanottimia, joilla saadaan suuri määrä kuvapisteitä. Toisaalta, suurelle alueelle jakautuneesta kohteen heijastamasta tehosta vastaanotetaan vain pieni osa, jolloin kuvausmenetelmä on epäherkempi verrattuna menetelmiin, joissa suuri osa kohteen heijastamasta tehosta saadaan mitattua suuren vastaanotinmäärän ansiosta.

2.2.2 EPÄSUORA HOLOGRAFINEN KUVAAUS

Tavanomaisesta hologafisesta kuvauksesta poiketen epäsuorassa holografisessa kuvauksessa ei tarvita koherenttia vastaanottoa. Ainoastaan sähkökentän voimakkuutta mitataan. Kuten myöhemmin esitetään, kohteen heijastaman kentän vaihe saadaan selville Fourier-muuntamalla apertuurilla mitattu sähkökentän voimakkuus ja suodattamalla saatua spektriä sopivasti. Epäsuorassa holografisessa kuvauksessa kohteelta heijastuneen kentän vaihetieto on moduloitu sähkökentän voimakkuuteen tunnetun referenssikentän avulla. Epäsuoran holografisen kuvauksen periaatteen esitti Tricoles [35] (kuva 2.9). Epäsuorassa holografisessa kuvauksessa kaksi kenttää, kohteelta heijastunut kohdekenttä ja apertuuria vinosti valaiseva referenssikenttä, muodostavat interferenssikuvion apertuurilla. Kohdekentän amplitudi ja vaihe voidaan saada selville interferenssikuvion Fourier-muunnoksen avulla.

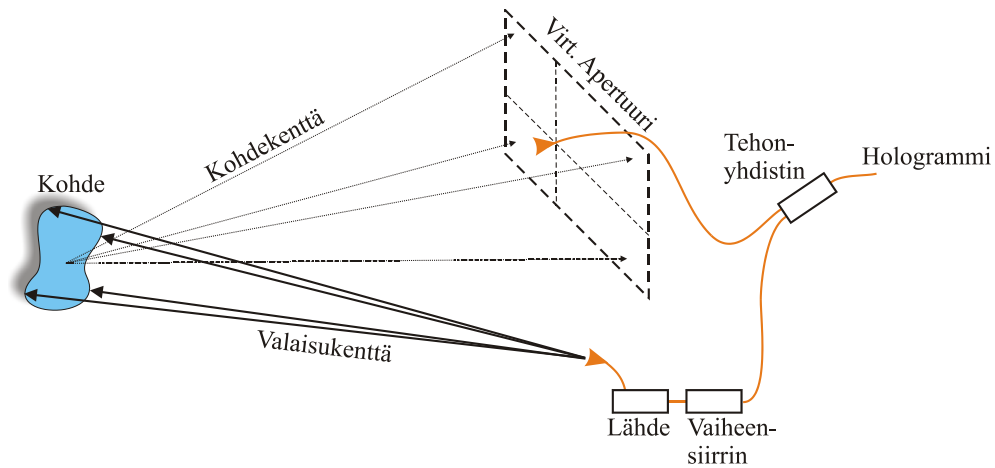


Kuva 2.9. Epäsuora holografinen kuvaus Tricolesin esittämänä [35].

Sähkökentän voimakkuus voidaan mitata kuvausjärjestelmän apertuurilla yksinkertaisilla diodi-ilmaimilla tai bolometreillä, jolloin mitattavana signaalina on audiotaajuinen jännite tai resistanssi. Kun kohteelta heijastuneen sähkökentän vaihe on saatu selville, kohteen kuva voidaan muodostaa yllä esitellyllä holografisella menetelmällä.

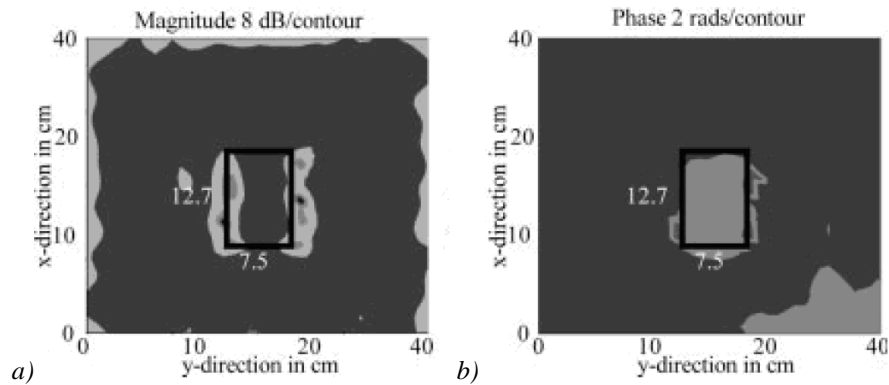
Mikäli kohteen heijastaman sähkökentän vaihe saadaan tarkasti palautettua epäsuoralla holografisella menetelmällä, on sillä samat edut kuin suoralla holografisella menetelmällä, jossa sähkökentän sekä amplitudi että vaihe mitataan suoraan. Epäsuora holografinen menetelmä asettaa kuitenkin rajoituksia kuvattava kohteen koolle ja referenssikentän muodolle. Toisin kuin kirjallisuudessa on esitetty [27], [36], osoittautuu (ks. kappale 5.2.1), että tavanomaisen millimetrialueen torviantennin muodostamaa keilaa voidaan käyttää referenssikenttänä. Lisäksi riittää, että referenssikentän luomiseen käytetyn antennin sijainti apertuuriin nähden tunnetaan, jolloin referenssikenttä voidaan simuloida riittävällä tarkkuudella, ja saatu millimetriaaltokuva on täysin verrattavissa suoralla holografisella menetelmällä otettuun kuvaan.

Epäsuora holografinen kuvaus on aiemmin toteutettu käyttäen vapaassa tilassa etenevän referenssikentän sijaan referenssisignaalia, joka johdetaan kohdekentän kanssa vastaanottimelle tehonyhdistimen avulla [26], [27]. Hologrammin interferenssikuvio siis syntyy tehonyhdistimen summatessa kaksi signaalia. Menetelmässä käytetään yhtä apertuurin yli liikutettavaa vastaanotinta ja tasomaista referenssikenttää simuloidaan vaihesiirtimellä. Vaihesiirtoa muutetaan, kun vastaanotin liikkuu referenssikentän tulokulman tasossa, jolloin valitsemalla vaihesiirron määrä sopivasti, virtuaalisen referenssikentän tulokulmaa voidaan muuttaa. Virtuaalinen referenssikenttä mahdollistaa 90°:a suuremman tulokulman, jolloin vaatimus riittävän suuresta referenssikentän tulokulmasta on helposti toteutettavissa. Referenssikentän tulokulma voidaan myös helposti vaihtaa vaikkapa x -akselilta y -akselille, mikä mahdollistaa stereoskooppisen kuvauksen [27]. Kuvassa 2.10 on esitetty käytetty kuvauslaitteisto.



Kuva 2.10. Epäsuora holografinen kuvaus, kun referenssikentän sijaan käytetään referenssisignaalia, joka syötetään kaapelin ja tehonyhdistimen avulla vastaanottimelle [26].

Kuvassa 2.11 on esitetty mikroaaltokuva, joka on otettu yllä kuvatulla menetelmällä 10 GHz:llä. Kuvassa esitetään sekä amplitudi että vaihe kohteesta heijastuneesta kentästä. Kuvausaperttuurin koko oli $40 \times 40 \text{ cm}^2$ ja näytteistysväli oli 1 cm. Kohteena käytettiin $12,7 \times 7,5 \times 0,5 \text{ cm}^3$ PVC-muovikappaletta, joka asetettiin vesitaustaa vasten 15 cm:n etäisyydelle virtuaalisesta aperttuurista.



Kuva 2.11. Viitteessä [26] esitellyllä epäsuoralla holografisella menetelmällä saatu mikroaaltokuva.

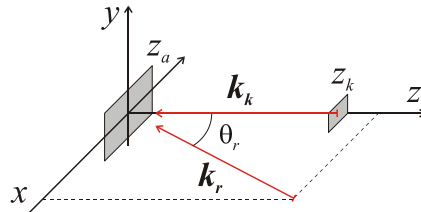
Kuvasta 2.11 huomataan, että menetelmän tuottamassa amplitudikuvassa PVC-kappaleesta nähdään parhaiten kappaleen reunat. Vaihekuvasa kappale nähdään kokonaisuudessaan. Kappaleen koko rekonstruoidussa kuvassa vastaa hyvin kappaleen todellista kokoa. Kappale toistuu kuvassa noin $\lambda/2$:n tarkkuudella.

3 EPÄSUORAN HOLOGRAFISEN KUVAAUKSEN TEORIA

Tässä luvussa esitellään epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvää teoriaa. Aluksi käydään läpi kuvaukseen liittyvät perusmuuttujat ja koordinaatistojärjestelmä. Tasoaaltoesitys ja kentän etenemistä vapaassa tilassa kuvaava teoria johdetaan alkaen Maxwellin yhtälöistä. Holografiseen kuvaukseen liittyvä kompleksisen kentän palauttaminen interferenssikuvioista käydään läpi ja kohdekentän palauttamista tutkitaan käyttäen erityistapauksina taso- sekä palloaaltokenttää referenssikenttänä. Käytännön kuvauksessa kaikki suureet mitataan vain yksittäisissä pisteissä tietyssä alueessa, joten kaikki jatkuvat yhtälöt on diskretoitava. Samalla kuvausmenetelmälle tulee perusrajoituksia, kuten äärellinen erotuskyky ja näkökenttä. Nämä suureet johdetaan kuvausjärjestelmän käytännön toteutuksesta, kuten vastaanotinten lukumäärästä ja apertuurin koosta. Menetelmään liittyvän *Fast Fourier Transform (FFT)* -algoritmin erityispiirteet on otettava huomioon muunnoksia tehtäessä, jolloin päädytään vaatimukseen riittävän tiheästä mittauspisteistöstä ja joudutaan käyttämään ikkunointifunktiota Fourier-muunnettavaan signaaliin pienentämään ei-jaksollisuudesta johtuvia häiritseviä ilmiöitä.

3.1 KOORDINAATISTO JA PERUSMUUTTUJAT

Holografisessa kuvauksessa kohde- ja referenssikentän interferenssikuvio mitataan suorakaiteen muotoisella apertuurilla, joka sijaitsee suorakulmaisessa koordinaatistossa tasolla $z = z_a$ ja rajoittuu alueelle $x \in [-L_x, L_x]$ ja $y \in [-L_y, L_y]$. Kohde, josta kohdeaalto on heijastunut, sijaitsee tasolla $z = z_k$, jolloin myös kohde oletetaan tasomaiseksi. Kohdekentän tulokulma apertuurilla olisi siis kohtisuora, mikäli kohdekenttä olisi tasoaalto. Referenssikentän tulokulma apertuurilla on vino. Analyysin helpottamiseksi ja käytännön syistä referenssikenttä asetetaan siten, että sen suunta poikkeaa kohtisuorasta apertuuriin nähden vain x -akselin suunnassa kulman θ_r verran. Oletetaan aluksi myös, että referenssiaalto on tasoaalto. Tilanne on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Epäsuoran holografisen kuvauksen perusgeometria.

Kuvassa 3.1 kohde- ja referenssikenttiä kuvaavat aaltovektorit \mathbf{k}_k ja \mathbf{k}_r . Aaltovektorit voidaan jakaa koordinaattiakselien suuntaisiin komponentteihin, joiden suuruudet riippuvat toisistaan ja aaltovektorin itseisarvosta k seuraavalla tavalla:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2. \quad (3.1)$$

Jos aaltovektorin x - ja y -komponentit tunnetaan, z -komponentti saadaan muista:

$$k_z = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2}, \quad (3.2)$$

jossa aaltovektorin itseisarvo on kirjoitettu vapaan tilan aallonpituuden λ avulla. Aaltovektorin x - ja y -akselien suuntaiset komponentit voidaan toisaalta ilmoittaa aallon tulosuunnan perusteella, jolloin saadaan

$$k_x = k \sin \theta_x \text{ ja } k_y = k \sin \theta_y, \quad (3.3)$$

jossa θ_x ja θ_y ovat kulmat z -akselilta positiivisen x - ja y -akselin suuntaan.

3.2 TASOAALTOSPEKTRI

Tässä kappaleessa kuvauksessa käytetty tasoaaltospektri johdetaan lähtien Maxwellin yhtälöistä, ja se diskretoidaan todelliseen mittaustilanteeseen sopivaksi. Aluksi oletetaan tilanne, jossa tasoaaltospektri määritellään pistetaajuudella. Pistetaajuinen tasoaaltospektri yleistetään laajakaistaiseen tapaukseen, ja diskreetin tasoaaltospektrin erotuskyvyn riippuvuutta muista määreistä käsitellään. Tasoaaltospektrin johtamisessa seurataan viitteitä [37], [38], [39], [40].

3.2.1 TASOAALTOSPEKTRI JATKUVILLA SUUREILLA

Aikariippuvaa sähkömagneettista kenttää voidaan kuvata Maxwellin yhtälöillä:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad (3.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3.7)$$

joissa \mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus, \mathbf{B} on magneettikentän vuontiheys, \mathbf{H} on magneettikentän voimakkuus, \mathbf{D} on sähkökentän vuontiheys, \mathbf{J} on virrantiheys ja ρ on tilavaraustiheys.

Kun kenttävektoreille oletetaan $e^{-j\omega t}$ -muotoinen aikariippuvuus, Maxwellin yhtälöt tulevat aikaharmoniseen muotoon

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B}, \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}, \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3.11)$$

joissa $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ ja $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$. Sijoitetaan väliaineparametrit (ε_0, μ_0) yhtälöihin ja käsitellään kenttiä lähteettömässä ja virrattomassa tyhjiössä. Saadaan yhtälöryhmä, joka riippuu kahdesta vektorisuureesta:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu_0 \mathbf{H}, \quad (3.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (3.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (3.14)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0. \quad (3.15)$$

Sijoittamalla \mathbf{H} yhtälöstä (3.12) yhtälöön (3.13), saadaan

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -j\omega \mu_0 j\omega \varepsilon_0 \mathbf{E} = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \mathbf{E}. \quad (3.16)$$

Kaksoisristitulosta saadaan $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$. Lähteettömyyden perusteella sähkökentän divergenssi on nolla, ja sähkökentälle saadaan Helmholtzin yhtälö:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \mathbf{E} = 0, \quad (3.17)$$

jossa

$$\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 = k^2, \quad (3.18)$$

jossa λ on sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus tyhjiössä. Jos oletetaan, että sähkökenttä on y-akselin suuntainen, Helmholtzin yhtälön ratkaisu voidaan kirjoittaa muotoon

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{u}_y E_0 e^{-ik \cdot \mathbf{r}}, \quad (3.19)$$

jossa aaltovektori esitettynä karteesisen koordinaatiston yksikkövektorien \mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y ja \mathbf{u}_z avulla on

$$\mathbf{k} = k_x \mathbf{u}_x + k_y \mathbf{u}_y + k_z \mathbf{u}_z, \quad (3.20)$$

ja paikkavektori on

$$\mathbf{r} = x\mathbf{u}_x + y\mathbf{u}_y + z\mathbf{u}_z, \quad (3.21)$$

ja E_0 on sähkökentän amplitudi. Lisäksi vaaditaan, että $|\mathbf{k}| = k$. Koska sähkökentällä on vain y -akselin suuntainen komponentti, vektorimerkinnästä voidaan luopua ja saadaan skalaarinen sähkökenttä muotoa $E(r) = E_y(x, y, z)$.

Sähkökenttää kuvaava tasoaaltospektri saadaan Fourier-muuntamalla Helmholtzin yhtälö:

$$F\{\nabla^2 E_y\} + F\{k^2 E_y\} = 0 \Rightarrow \quad (3.22)$$

$$\nabla^2 F\{E_y\} + k^2 F\{E_y\} = 0 \Rightarrow \quad (3.23)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} A_y + 4\pi^2 w^2 A_y = 0, \quad (3.24)$$

jossa tasoaaltospektri on

$$A_y(u, v, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, y, z) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy, \quad (3.25)$$

ja dispersioyhtälö w on

$$w(u, v) = \frac{k_z}{2\pi} = \sqrt{\left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 - u^2 - v^2}. \quad (3.26)$$

Tasoaaltospektri on esitys, jossa tietyllä z -tasolla tunnetun sähkömagneettisen kentän ajatellaan koostuvan eri suunnista tasolle tulevista tasoaalloista. Dispersioyhtälö (3.26) sekä Fourier-muuttujat u ja v liittyvät suoraan aaltovektorin \mathbf{k} komponentteihin k_x , k_y ja k_z , jotka riippuvat tasoaaltokomponenttien tulosuunnista:

$$u = \frac{k_x}{2\pi}, \quad v = \frac{k_y}{2\pi} \quad \text{ja} \quad w = \frac{k_z}{2\pi}. \quad (3.27)$$

Osittaisdifferentiaaliyhtälön (3.24) ratkaisut ovat muotoa

$$A_y(u, v, z) = A_0^+(u, v) e^{-jqz} + A_0^-(u, v) e^{jqz}. \quad (3.28)$$

Sijoittamalla yrite osittaisdifferentiaaliyhtälöön (3.24), saadaan

$$\frac{d^2}{dz^2} (A_0^+(u, v) e^{-jqz} + A_0^-(u, v) e^{jqz}) + 4\pi^2 w^2 (A_0^+(u, v) e^{-jqz} + A_0^-(u, v) e^{jqz}) = 0 \Rightarrow \quad (3.29)$$

$$-q^2 (A_0^+(u, v) e^{-jqz} + A_0^-(u, v) e^{jqz}) + 4\pi^2 w^2 (A_0^+(u, v) e^{-jqz} + A_0^-(u, v) e^{jqz}) = 0 \Rightarrow \quad (3.30)$$

$$-q^2 + 4\pi^2 w^2 = 0 \Rightarrow \quad (3.31)$$

$$q = \pm 2\pi w. \quad (3.32)$$

Ratkaisu on siis muotoa

$$A_y(u, v, z) = A_0^+(u, v)e^{-j2\pi wz} + A_0^-(u, v)e^{j2\pi wz}. \quad (3.33)$$

Tasoaaltospektrille voidaan tehdä käänteinen Fourier-muunnos, jolloin alkuperäiselle sähkökentälle saadaan ratkaisu:

$$E_y(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_0^+(u, v)e^{-j2\pi wz} e^{j2\pi(ux+vy)} dudv + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_0^-(u, v)e^{j2\pi wz} e^{j2\pi(ux+vy)} dudv. \quad (3.34)$$

Mikäli w on imaginaarinen, eli $\left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 < u^2 + v^2$, sähkökentän ratkaisut kuvaavat eksponentiaalisesti vaimenevia tai kasvavia aaltoja. Vaimenevat aallot liittyvät säteilylähteen reaktiiviseen lähikenttään, ja ne vaimenevat voimakkaasti etäisyyden kasvaessa, eikä niitä oteta huomioon apertuurin etäisyydellä kohteesta. Kun w on reaalinen, ratkaisut kuvaavat positiivisen ja negatiivisen z -akselin suuntaan eteneviä tasoaaltoja. Jos puoliavaruuden $z < z_k$ oletetaan olevan lähteetön, aallot etenevät negatiiviseen z -akselin suuntaan ja $A_0^- = 0$. Kasvavia aaltojakaan ei voi olla, jos kohde on ainoa lähde. Nyt saadaan Fourier-muunnos -pari:

$$A_y(u, v, z = z_a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, y, z = z_a) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy, \quad (3.35)$$

$$E_y(x, y, z = z_k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_y(u, v, z = z_a) e^{-j2\pi wz} e^{j2\pi(ux+vy)} dudv. \quad (3.36)$$

Nyt mikä tahansa tasossa $z = z_a$ tunnettu kenttä voidaan laskea Fourier-muunnoksen avulla kohdetasossa $z = z_k$. Oleellisesti on mahdollista laskea kohteen pinnalta heijastunut kenttä apertuurilla mitatusta kentästä.

3.2.2 TASOAALTOSPEKTRI DISKREETEILLÄ SUUREILLA

Mitattaessa todellista kenttäjakautumaa tasolla $z = z_a$, mittausalue on rajoitettu alueelle $x \in [-L_x, L_x]$ ja $y \in [-L_y, L_y]$, joissa L_x ja L_y ovat mittausalueen puolileveydet x - ja y -suunnissa. Lisäksi todellinen mittaus ei voi olla jatkuva, vaan kenttää mitataan yksittäisissä pisteissä. Nyt yhtälöiden (3.34) ja (3.35) Fourier-muunnoksissa olevia äärettömiä ja jatkuvia integraaleja ei enää voida käyttää, vaan ne on saatettava summamuotoon. Jos mittausalue näytteistetään M näytteellä x -suunnassa ja N näytteellä y -suunnassa,

näytteistysväliksi saadaan $\Delta x = 2L_x/M$ ja $\Delta y = 2L_y/N$ ja mittauspisteiden koordinaatit ovat

$$x_m = m\Delta x, \quad m = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} + 1, \quad (3.37)$$

$$y_n = n\Delta y, \quad n = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} + 1. \quad (3.38)$$

Fourier-muuttujille saadaan $\Delta u = 1/(M\Delta x)$ ja $\Delta v = 1/(N\Delta y)$, jolloin Fourier-muunnos saadaan pisteissä

$$u_i = i\Delta u, \quad i = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} + 1, \quad (3.39)$$

$$v_k = k\Delta v, \quad k = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} + 1, \quad (3.40)$$

Joista vastaavat aaltovektorin komponentit saadaan dispersioyhtälöstä (3.26) ja yhtälöistä (3.27). Diskreetille Fourier-muunnokselle voidaan kirjoittaa

$$A_y(u_i, v_k, z = z_a) = \frac{\Delta x \Delta y}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_y(x_m, y_n, z = z_a) e^{-j2\pi(u_i x_m + v_k y_n)}, \quad (3.41)$$

$$E_y(x_m, y_n, z = z_k) = \Delta u \Delta v \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_y(u_i, v_k, z = z_a) e^{-j2\pi v(z_i - z)} e^{j2\pi(u_i x_m + v_k y_n)}. \quad (3.42)$$

3.2.3 LAAJAKAISTAINEN TASOAALTOSPEKTRI

Luvussa 2 esitettiin suora holografinen menetelmä [9], [10], [11], jossa laajakaistaisella mittauksessa on mahdollista saada fokuksessa olevia millimetriaaltokuvia syvistä kohteista (kuva 2.6). Laajakaistaisella holografisella kuvauksella on riittävä syvyyserotuskyky, joka perustuu kohteelta heijastuneen pulssin kulkuaikaan – taajuusalueessa esitettynä. Kun taajuus merkitään muuttujaksi, saadaan yhtälö (3.41) muotoon

$$A_y(u_i, v_k, f_l, z = z_a) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_y(x_m, y_n, z = z_a, f_l) e^{-j2\pi(u_i(f_l)x_m + v_k(f_l)y_n)}, \quad (3.43)$$

jossa yhtälön oikealla puolella oleva vakio kerroin on jätetty pois ja Fourier-muuttujat u_i ja v_k ovat nyt riippuvaisia taajuudesta

$$f_l = f_{\text{keskit.}} + l\Delta f, \quad l = -\frac{P}{2}, \dots, \frac{P}{2} + 1, \quad (3.44)$$

jossa P on taajuuspisteiden lukumäärä, $f_{keskit.}$ on käytettävän taajuuskaistan keskitaajuus ja Δf on taajuuspisteiden väli. On huomattava, että diskreettien muuttujien u_j ja v_k muodostama pisteistö kattaa yhä suuremman alueen taajuuden kasvaessa. Kun muuttuva taajuus ja kaksi Fourier-muuttujaa sijoitetaan dispersioyhtälöön (3.26), saadaan

$$w(u_i, v_k, f_l) = \sqrt{\left(\frac{f_l}{c}\right)^2 - u_i^2 - v_k^2}. \quad (3.45)$$

Nyt yhtälöt (3.43) ja (3.42) voidaan kirjoittaa muotoon

$$A_y(u_{il}, v_{kl}, w_{ikl}, z = z_a) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_y(x_m, y_n, z = z_a, f_l) e^{-j2\pi(u_l x_m + v_{kl} y_n)}, \quad (3.46)$$

$$E_y(x_m, y_n, z_l) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_y(u_{il}, v_{kl}, w_{ikl}, z = z_a) e^{j2\pi(u_l x_m + v_{kl} y_n + w_{ikl} z_l)}. \quad (3.47)$$

Erityisesti on huomattava, että w_{ikl} ei saa tasavälisiä arvoja, jolloin FFT-algoritmia ei voida suoraan käyttää integraalien laskemiseen. Ongelma voidaan kiertää näytteistämällä w_{ikl} uudelleen tasaväliseksi interpoloimalla ei-tasavälistä pisteistöä [9].

3.3 TASOAALTOSPEKTRI EPÄSUORASSA HOLOGRAFISESSA KUVAAUKSESSA

Tasoaaltospektrin avulla sähkömagneettinen kenttä voidaan jakaa eri suuntiin eteneviin tasoaaltoihin. Laskettaessa tasoaaltospektri tasoaallosta, saadaan tulokseksi vain yksi spektrikomponentti, joka kertoo tasoaallon etenemissuunnan. Palloaallon tasoaaltospektri on äärettömän leveä, sillä sen voidaan ajatella koostuvan äärettömästä määrästä eri suuntiin eteneviä tasoaaltorintamia.

3.3.1 KOHDEKENTÄN PALAUTTAMINEN INTERFERENSSIKUVIESTA

Tasoaaltospektrin komponentteja voidaan muokata ja sen avulla tietyllä tasolla tunnettu kenttä voidaan määrittää millä tahansa muulla tasolla. Jälkimmäinen menetelmä on tunnettu englanninkielisellä termillä *backpropagation*. Tässä tekstissä menetelmästä käytetään nimitystä sähkömagneettisen kentän palauttaminen. Tasoaaltospektriä muokkaamalla kentästä voidaan poistaa tiettyjä tasoaaltokomponentteja tai aaltojen etenemissuuntaa voidaan muuttaa matemaattisesti. Mitattua sähkömagneettista kenttää käsiteltäessä tehdään ensin kentän Fourier-muunnos, jolloin saadaan tasoaaltospektri. Spektriä voidaan käsitellä yllä mainituilla menetelmillä, jonka jälkeen tehdään käänteinen Fourier-muunnos, jolloin saadaan tulokseksi halutulla tavalla käsitelty kenttä.

Sähkökentän sekä amplitudi- että vaiheinformaatio on tunnettava, jotta tasoaaltospektriä voidaan käyttää. Epäsuorassa holografisessa kuvauksessa kentän vaihetta ei kuitenkaan tunneta suoraan, vaan ainoastaan kohde- ja referenssikentän interferenssikuvion amplitudi. Kentän vaihe voidaan määrittää amplitudimittauksesta, sillä interferenssikuvion

kohdeaallon kanssa muodostanut referenssiaalto tunnetaan, ja kohdeaallon vaikutus kenttään voidaan erottaa referenssiaallosta. Ilmaisimilla saatu teho voidaan kirjoittaa muodossa

$$P(x_m, y_n) \propto I(x_m, y_n) = |E_r + E_k|^2 = |\operatorname{Re}\{E_r\} + j\operatorname{Im}\{E_r\} + \operatorname{Re}\{E_k\} + j\operatorname{Im}\{E_k\}|^2, \quad (3.43)$$

jossa E_r ja E_k ovat kompleksiset referenssi- ja kohdekentät. Sähkökentälle oletetaan y-akselin suuntainen lineaarinen polarisaatio, jolloin kenttien vektorimerkinnästä voidaan luopua. Teho voidaan edelleen kirjoittaa muotoon

$$I(x_m, y_n) = \sqrt{(\operatorname{Re}\{E_r\} + \operatorname{Re}\{E_k\})^2 + (\operatorname{Im}\{E_r\} + \operatorname{Im}\{E_k\})^2}, \quad (3.44)$$

$$I(x_m, y_n) = (\operatorname{Re}\{E_r\} + \operatorname{Re}\{E_k\})^2 + (\operatorname{Im}\{E_r\} + \operatorname{Im}\{E_k\})^2, \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} I(x_m, y_n) &= \operatorname{Re}\{E_r\}^2 + 2\operatorname{Re}\{E_r\}\operatorname{Re}\{E_k\} + \operatorname{Re}\{E_k\}^2 \\ &\quad + \operatorname{Im}\{E_r\}^2 + 2\operatorname{Im}\{E_r\}\operatorname{Im}\{E_k\} + \operatorname{Im}\{E_k\}^2. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Sijoittamalla kohde- ja referenssikentän karteesiset kompleksiesitykset

$$E_k = E_{k,R} + jE_{k,I}, \quad (3.47)$$

$$E_r = E_{r,R} + jE_{r,I}, \quad (3.48)$$

tehon yhtälöön (3.46), saadaan

$$\begin{aligned} I(x_m, y_n) &= E_{r,R}^2 + E_{r,I}^2 + E_{k,R}^2 + E_{k,I}^2 + 2(E_{r,R}E_{k,R} + E_{r,I}E_{k,I}) \\ &= |E_r|^2 + |E_k|^2 + E_r^* E_k + E_r E_k^*. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Referenssikenttään moduloitunut kohdekenttä voidaan erottaa Fourier-muunnoksen avulla. Tehon (3.49) Fourier-muunnos on

$$F\{I\} = F\{|E_r|^2\} + F\{|E_k|^2\} + F\{E_r^*\} \otimes F\{E_k\} + F\{E_r\} \otimes F\{E_k^*\}, \quad (3.50)$$

jossa \otimes merkitsee konvoluutio-operaatiota ja $*$ kompleksikonjugaattia. Yhtälön (3.50) kaksi ensimmäistä termiä ovat kohde- ja referenssikentän autokorrelaatiofunktiot, jotka kuvaavat kenttien tehoa. Tieto kohdekentän vaiheesta ja amplitudista sisältyy molempiin konvoluutioihin yhtälön (3.50) oikealla puolella. Riippuen kohde- ja referenssikentän luonteesta ja referenssikentän tulosuunnasta, toinen spektrin (3.50) konvoluutiotermistä voidaan erottaa muista termeistä suodattamalla spektriä sopivasti, jolloin saadaan

$$F\{I\}_{suod.} = F\{E_r^*\} \otimes F\{E_k\}. \quad (3.51)$$

Kohdekenttä saadaan selville dekonvolvoimalla suodatettua spektriä referenssiaallon kompleksikonjugaatilla:

$$E_k = \frac{F^{-1}\{F\{E_r^*\} \otimes F\{E_k\}\}}{E_r^*}. \quad (3.52)$$

Kohteesta saadaan kuva laskemalla kohteesta heijastunut kenttä kohteen luona käyttäen palautuskaavoja (3.34) ja (3.35). Mikäli valaisukenttä tunnetaan kohteen luona, voidaan kohteesta saada heijastuskerroinkartta yhtälöllä (2.13).

3.3.2 PIENIN REFERENSSIKENTÄN TULOKULMA JA EROTUSKYKY

Jotta kohdekenttä (3.52) saadaan palautettua onnistuneesti, tulee yhtälön (3.50) termien spektrien erottua toisistaan. Tässä kappaleessa käsitellään niitä vaatimuksia, joiden tulee täyttyä, jotta edellä mainitut konvoluutitermit yhtälössä (3.50) erottuvat.

Aluksi oletetaan viitteen [38] mukaan, että referenssi- ja kohdekentän tasoaaltospektreillä on rajoitetut kaistanleveydet B_r ja B_k (yksikkönä m^{-1}). B_r :llä ja B_k :lla merkitään vastaavan spektrikomponentin puolileveyttä kuvan 3.2 mukaisesti. Yhtälön (3.50) autokorrelaatiofunktioiden kaistanleveydet ovat vastaavasti $2B_r$ ja $2B_k$. Konvoluutitermien kaistanleveydet ovat konvoloitavien kenttien tasoaaltospektrien kaistanleveyksien summa, $B_r + B_k$. Konvoluutitermit siis erottuvat toisistaan ja autokorrelaatiotermeistä, kun referenssikentän spektrin keskipiste on siirtynyt korkeammalle aaltoluvulle $k_{kriit.}$:

$$k_{kriit.} = \max(2B_r, 2B_k) + B_r + B_k. \quad (3.53)$$

Kun $k_{kriit.}$ on määritelty, saadaan myös suurin taajuus, joka voi esiintyä spektrissä (3.50):

$$k_{maks.} = k_{kriit.} + B_r + B_k = \max(2B_r, 2B_k) + 2B_r + 2B_k. \quad (3.54)$$

Spektriä (3.50) on havainnollistettu kuvassa 3.2, kun tilanne on yhtälöiden (3.53) ja (3.54) mukainen.

Jos koordinaatisto määritellään siten, että referenssikentän spektri on siirtynyt vain aaltovektorin x -komponentin suunnassa (kuva 3.1), saadaan Nyqvistin ehdon mukaisesti kentän näytteistysväliksi (mm. viitteiden [26], [27], [39] mukaan)

$$\Delta x = \frac{\pi}{k_{x,maks.}}. \quad (3.55)$$

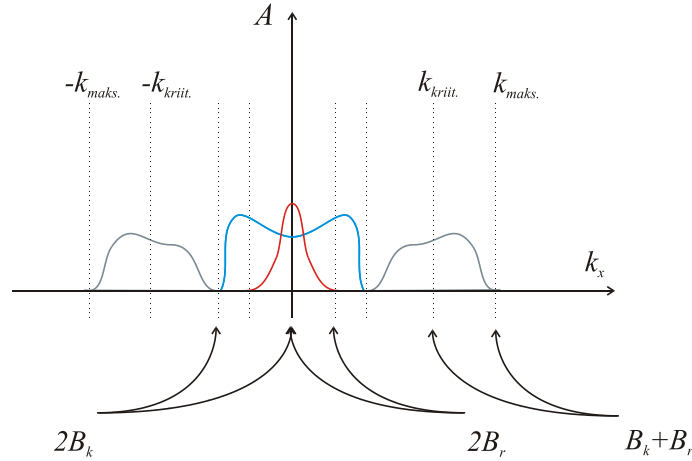
Kun käytettävissä on M kappaletta vastaanottimia x -akselilla, saadaan FFT:lla saadun spektrin (3.49) aaltolukuresoluutioksi

$$\Delta k_x = \frac{\pi}{M\Delta x}, \quad (3.56)$$

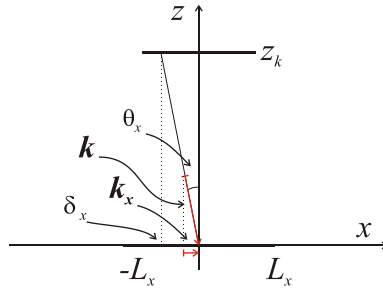
ja vastaanotinryhmän näkökentäksi

$$\theta_{x,näkök} = \pm \sin^{-1} \left(\frac{k_{x,maks.}}{k} \right). \quad (3.57)$$

On huomattava, ettei yhtälö (3.57) kuvaa lopullisen millimetriaaltokuvan näkökenttää, vaan (sähköistä) näkökenttää, joka vaaditaan apertuurille tulevien kenttien interferenssikuvion mittaamiseen.



Kuva 3.2. Interferenssikuvion spektri (yhtälö (3.50)). Referenssi- (punaisella) ja kohdekentän (sinisellä) autokorrelaatiofunktiot sekä konvoluutiotermit (siniharmaalla).



Kuva 3.3. Erotuskyvyn määrittäminen.

Holografisen kuvauksen poikittainen erotuskyky kohteen etäisyydellä saadaan resoluution (3.56) ja kuvan 3.3 avulla:

$$\frac{k_x}{k} = \frac{\delta_x}{z_k} \cos \theta_x \Rightarrow \quad (3.58)$$

$$\delta_x = \frac{k_x z_k}{k \cos \theta_x} \approx \frac{k_x z_k}{k} \Rightarrow \quad (3.59)$$

$$\Delta\delta_x = \frac{\Delta k_x z_k}{k} = \frac{\pi z_k}{M\Delta x k} = \frac{\lambda z_k}{4L_x}, \quad (3.60)$$

joissa z_k on kohteen etäisyys apertuurista, L_x on apertuurin puolileveys x -suunnassa ja M on vastaanotinten määrä x -akselilla. Erotuskyky on approksimaatio ja se huononee (3.60):stä siirryttäessä kauemmas apertuurin akselilta.

3.3.3 TASOAALTO REFERENSSIKENTTÄNÄ

Kohde- ja referenssikentät apertuurilla voidaan kirjoittaa muotoon

$$E_k(x_m, y_n, z = z_a) = A_k(x_m, y_n) e^{j\theta_k(x_m, y_n)}, \quad (3.61)$$

$$E_r(x_m, y_n, z = z_a) = A_r(x_m, y_n) e^{j\theta_r(x_m, y_n)}, \quad (3.62)$$

joissa kohde- ja referenssikentän amplitudit ovat A_k ja A_r . Vastaavasti kohde- ja referenssikentän vaiheet ovat θ_k ja θ_r . Jos oletetaan, että referenssikenttä on tasoaalto, joka etenee $x - y$ -tasossa kulmassa θ_x z -akseliin nähden (kuva 3.1), saadaan referenssikentälle kuvaus:

$$E_r(x_m, y_n, z = z_a) = A_r e^{jk_x x_m}, \quad k_x = k \sin \theta_x, \quad (3.63)$$

jossa A_r on tasoaallon vakiona pysyvä amplitudi.

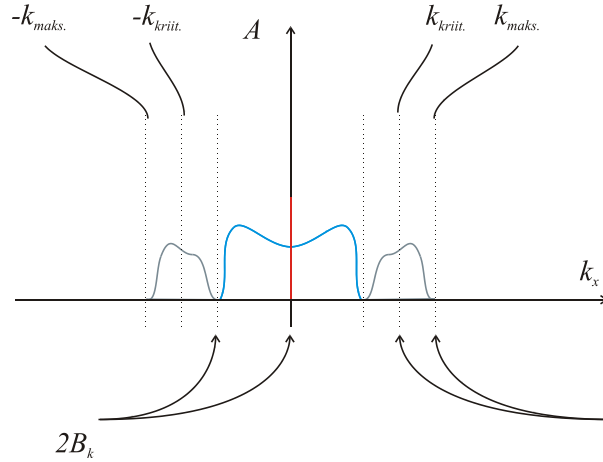
Nyt teho tulee muotoon

$$I(x_m, y_n) = A_r^2 + A_k^2(x_m, y_n) + A_r A_k(x_m, y_n) e^{-j(k_x x_m + \theta_k(x_m, y_n))} + A_r A_k(x_m, y_n) e^{j(k_x x_m - \theta_k(x_m, y_n))}. \quad (3.64)$$

Nähdään, että yhtälön (3.64) ensimmäinen termi kuvaa interferenssikuvion vakiokomponenttia. Toinen termi riippuu kohdekentän amplitudijakaumasta. Kolmas ja neljäs termi sisältävät kohde- ja referenssikenttien amplitudiin tulon ja vaihetermin. Vaihetermissä on kohdekentän tuntematon vaihe ja referenssikentän vaihe, joka tunnetaan. Vinosti apertuurille tuleva tasomainen referenssikenttä luo lineaarisen vaiheen muutoksen 3. ja 4. termeissä oleviin eksponentteihin. Toisin sanoen, 3. ja 4. termit ovat referenssikentän ansiosta moduloituneet korkeammalle tilataajuudelle.

Mikäli tasoaaltoa käytetään referenssikenttänä ja sen tulokulma apertuurille on riittävän suuri, tehospektri (3.50) on kuvan 3.4 mukainen. Referenssiaallon tuottama tilataajuus on sitä korkeampi, mitä suurempi tulokulma on, sillä aaltovektorin x -komponentti kasvaa tulokulman kasvaessa (yhtälö 3.63). Samalla 3. ja 4. termi siirtyvät yhä korkeammalle taajuudelle tehospektrissä. Tasoaaltoreferenssillä spektrikomponenttien siirtyminen korkeammalle taajuudelle on konvoluutio, jossa kohdekentän spektriä konvoloidaan

viivästetyllä impulssifunktiolla. Impulssifunktiolla konvolointi siirtää kohdekentän spektrin muuttumattomana impulssifunktiota vastaavalle etäisyydelle nollataajuudelta. Mikäli tulokulma on riittävän suuri, kohdekentän spektri on kokonaan erottunut muista termeistä tehospektrissä, ja kohdekenttä saadaan suodattamalla spektri (3.50) ensin muotoon (3.51) ja dekonvoluimalla (yhtälö 3.52). Tasoaallon tapauksessa dekonvoluutio on yksinkertainen siirto spektrissä (tasoaallon vakiolla amplitudilla kertominen jätetään huomiotta), jolloin varsinaista dekonvoluution laskemista kompleksisine referenssikenttineen ei tarvita.



Kuva 3.4. Spektri (3.50), kun tasoaaltoa käytetään referenssikenttänä.

3.3.4 PALLOAALTO REFERENSSIKENTTÄNÄ

On luontevaa käyttää tasoaaltokenttää referenssikenttänä, sillä se muokkaa tasoaaltospektriä yksinkertaisella tavalla. Kuitenkin käytännössä, tasoaaltoon verrattuna palloaalto on helpommin toteutettavissa, ja siksi se voisi soveltua tasoaaltoa paremmin epäsuoraan holografiseen kuvaukseen. Oletetaan, että palloaallon lähde on pisteessä (x_p, y_p, z_p) . Palloaallon kenttää apertuurilla $z = z_a$ voidaan kuvata seuraavasti:

$$E_r(x_m, y_n, z = z_a) = \frac{A_r e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}}{4\pi |\mathbf{r}|} = \frac{A_r e^{jk\sqrt{(x_m-x_p)^2 + (y_n-y_p)^2 + (z_a-z_p)^2}}}{4\pi\sqrt{(x_m-x_p)^2 + (y_n-y_p)^2 + (z_a-z_p)^2}}. \quad (3.65)$$

Kentän amplitudin etäisyysriippuvuus jätetään huomiotta. Nyt teho apertuurilla tulee muotoon

$$\begin{aligned} I(x_m, y_n) = & A_r^2 + A_k(x_m, y_n)^2 + A_r A_k(x_m, y_n) e^{j\left(k\sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z'-z_p)^2} - \theta_k(x_m, y_n)\right)} \\ & + A_r A_k(x_m, y_n) e^{-j\left(k\sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z'-z_p)^2} - \theta_k(x_m, y_n)\right)}. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Nyt referenssikentän tasoaaltospektri ei enää ole impulssifunktio, vaan spektri on leventynyt kuvaten palloaallon eri suuntiin eteneviä komponentteja ja tehospektri (3.50) muistuttaa kuvaa 3.2. Liitteessä A on esitetty ideaaliset taso- ja palloaallon

tasoaaltospektrit, kun spektrien laskemiseen käytetään FFT-algoritmia ja aaltojen tulokulmat ja palloaallon lähteen paikka vastaavat todellista mittaustilannetta, joka esitellään luvussa 4.

Palloaalto on tärkeä epäsuoran holografisen kuvauksen kannalta, kun käytetään korrugoidun torviantennin muodostamaa Gaussin keilaa referenssikenttänä. Osoittautuu (ks. kappale 5.2.1), että yhtälön (3.52) dekonvoluutio voidaan suorittaa ideaalisen palloaallon (3.65) avulla, jolloin epäsuoran holografisen kuvauksen suorituskyky on verrattavissa tilanteeseen, jossa mitattu referenssi on käytettävissä.

4 EPÄSUORA HOLOGRAFINEN KUVAAUS 310 GHz:LLÄ

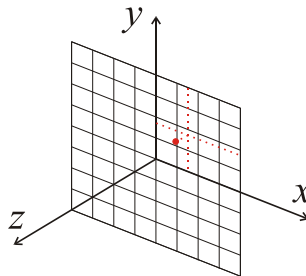
Tässä luvussa esitellään kokeellinen epäsuora holografinen kuvausjärjestely. Kuvaus toteutettiin 310 GHz:n taajuudella pystypolarisaatiolla. Lisäksi kuvaus tehtiin kahdella tavalla: a) käyttäen referenssikenttänä tasoaaltoa ja b) käyttäen referenssikenttänä korrugoidun torviantennin luomaa Gaussin keilaa. Referenssikentän tasoaalto luotiin antennimittauksiin suunnitellulla heijastustyyppisellä vaihehologrammilla [41]. Holografisen kuvauksen vaatima vastaanotinryhmä korvattiin liikuttamalla ainoastaan yhtä vastaanotinta kuvauslaitteiston apertuurin alueella.

4.1 KUVAAUSLAITTEISTO

4.1.1 TASOSKANNERI

Holografisessa kuvauksessa tarvittavaa vastaanotinryhmää jäljitellään tässä työssä liikuttamalla vastaanotinta kuvauslaitteen apertuurin yli ja tallentamalla vastaanotettu signaali kutakin ryhmän vastaanotinta vastaavassa kohdassa skannaustasolla.

Tasoskannerin mekaaninen epätarkkuus voi aiheuttaa virhettä sekä suorassa holografisessa kuvauksessa mitattuun vaiheeseen, että epäsuorassa holografisessa kuvauksessa mitattuun interferenssikuvion tehoon. Epätarkkuus voidaan kuitenkin tiettyyn pisteeseen asti poistaa skannerin automaattisella korjaustekniikalla, jossa vastaanotinta siirretään skannaustasosta kohtisuorassa suunnassa (z -akseli kuvassa 4.1) mitatun skannerin muodon mukaan. Myös skannerin paikkaan mittaustasolla (x - ja y -akselit kuvassa 4.1) liittyy epävarmuutta, eikä vastaanottimen paikka täysin seuraa ideaalista suorakulmaista pisteistöä.



Kuva 4.1. Tasoskannerin mekaaninen epävarmuus. Punainen piste osoittaa skannerissa olevan vastaanottimen todellisen paikan, joka poikkeaa oletetulta skannaustasosta (ruudukko) x -, y - ja z -suunnassa..

4.1.2 LÄHETIN-VASTAANOTIN

Kuvauksessa käytetyn lähetin-vastaanotin -parin muodosti AB Millimétré:n vektoripiirianalysointilaite, jonka taajuusalue oli laajennettu millimetriaaltoalueen yksiköillä ESA-1 ja ESA-2. Molemmat yksiköt perustuvat Gunn-oskillaattoriin, joka on

lukittu samaan vaihereferenssiin. Lähettimessä, yksikössä ESA-1, Gunn-oskillaattorin tuottama vaihelukittu signaali viedään harmoniseen taajuuskertojaan, jonka ulostulosta valitaan sopiva harmoninen taajuus ylipäästösuodattimella ohjattavaksi antennille. Vastaanottimessa, yksikössä ESA-2, on herkkä Schottky-diodiin perustuva harmoninen sekoitin, josta välitaajuinen signaali syötetään vektoripiirianalysaattoriin.

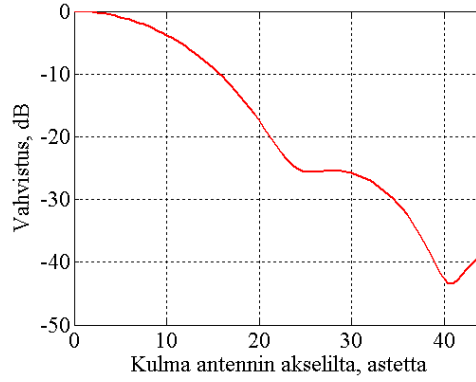
Laitteiston dynaaminen alue, ero pienimmän ja suurimman mitattavissa olevan signaalin välillä, on 310 GHz:llä noin 115 dB [42]. Suurin dynaaminen alue saavutetaan vain, kun lähetin ja vastaanotin on liitetty suoraan yhteen antennistaan. Vektoripiirianalysaattorilta saatu mittauslukema on keskiarvo useasta yksittäisestä näytteestä. Mitä suurempaa määrää näytteitä keskiarvoistetaan, sitä matalammaksi kohinataso saadaan, ja samalla laitteiston dynaaminen alue kasvaa. Tässä työssä vektoripiirianalysaattorin antama mittauksellinen oli keskiarvo 500 eri näytteestä. Näytemäärä muodostaa kompromissin mittaukseen kuluvan ajan ja mittauksen kohinatason välillä.

Vektoripiirianalysaattorin vaiheen ja amplitudin mittauserävarmuus on valmistajan mukaan alle 1° ja alle 0,1 dB, kun dynaaminen alue on yli 40 dB. Epävarmuus mittaustilanteessa on kuitenkin helposti huomattavasti suurempi, sillä varsinkin vaihe-epätarkkuutta lisää mittaussäätelyn lämpötila- ja mekaaninen epästabiilius. Mitattu vaihe ryömiä mittaustilanteen ympäristön lämpötilan mukana. Vaiheen ryömintää voidaan pitkissä mittauksissa jossain määrin kompensoida käyttämällä *tie scan* – menetelmää [43], jossa pitkän tasoskannauksen vaiheryömintä kompensoidaan mittaamalla vaihe nopeassa poikittaisessa skannauksessa koko mittaustilan yli, ja vertaamalla saatua vaihetta pitkään mittaukseen. Vaiheryömintää pyritään vähentämään kontrolloimalla mittaustilanteen ympäristön lämpötilaa. Myös kuvauslaitteiston kaapeleiden taipuminen aiheuttaa vaihevirhettä. Taipumisen aiheuttama virheen kompensointiin on kehitetty menetelmä [42], mutta sitä ei voitu tässä työssä käyttää. Mahdollinen virhe ei kuitenkaan vaikuta työn kannalta oleellisemman amplitudin mittaamiseen.

4.1.3 ANTENNIT

Käytettäessä tasoaaltoa referenssinä, lähettimessä ja vastaanottimessa käytettiin korrugoituja torviantenneja, joiden puolen tehon keilanleveys on $\pm 9^\circ$ (halkaisijaltaan 48 cm:n alue 1,5 m:n päässä antennista). Antennien vahvistukset suuntiin 33° ja 45° ovat -28 dB ja -38 dB, kun vahvistus on normalisoitu antennin pääkeilan suuntaan. Antennien normalisoitu vahvistus on esitetty kuvassa 4.2. Antennien normalisoimaton vahvistus on noin 20 dB.

Kun Gaussin keilaa käytettiin referenssi- ja valaisukenttänä, vastaanottoantennina toimi avoin aaltoputki. Käytetyn avoimen aaltoputken puolen tehon keilanleveys on 40° ja sen normalisoitu vahvistus suuntaan 45° on noin -15 dB. Käytetyn avoimen aaltoputken normalisoimaton vahvistus on noin 7 dB [44].



Kuva 4.2. Korrugoidun torviantennin normalisoitu vahvistus.

4.1.4 KUVAUSALUEEN GEOMETRIA

Epäsuorassa holografisessa kuvauksessa referenssikentän tulokulman kuvausjärjestelmän apertuurille on oltava riittävän suuri, jotta yhtälön (3.50) konvoluutitermit erottuvat sekä toisistaan että autokorrelaatiotermeistä. Tarvittavaa kriittistä aaltolukua (3.53) voidaan arvioida, kun tiedetään, että kuvattavien kohteiden koko tulee olemaan halkaisijaltaan pienempi kuin $D_k = 20$ cm ja kohteen etäisyys apertuurille on $z_k = 1,5$ m (kohteen halkaisija on $\sim 8^\circ$ apertuurilta katsottuna).

4.1.5 TASOMAISEN JA GAUSSISEN REFERENSSIKENTÄN TULOKULMA SEKÄ NÄYTTTEISTYSVÄLI APERTUURILLA

Kohdekentän tasoaaltospektrin aaltolukukaistanleveydeksi saadaan kuvan 4.3 perusteella

$$B_k = k \frac{D_k/2}{\sqrt{z_k^2 + (D_k/2)^2}} = k \frac{0,1\text{m}}{\sqrt{(1,5\text{m})^2 + (0,1\text{m})^2}} \approx 0,067k. \quad (4.1)$$

Kriittinen aaltoluku (3.53) tasoaaltoreferenssille siis on:

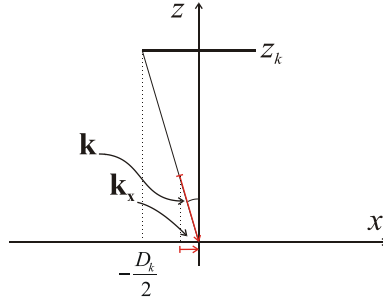
$$k_{kriit.} = 3B_k = 0,200k. \quad (4.2)$$

Apertuurilla mitattava suurin aaltoluku (3.54) on:

$$k_{maks.} = 2B_k + 2B_k = 0,266k. \quad (4.3)$$

Nyt saadaan referenssikentän tulokulmaksi:

$$\theta_{ref} = \pm \sin^{-1} \left(\frac{0,200k}{k} \right) \approx \pm 12^\circ. \quad (4.4)$$



Kuva 4.3. Kohdekentän tasoaaltospektrin aaltolukukaistanleveyden määrittäminen.

Apertuurilla interferenssikuvion näytteistysväli määräytyy suurimman mitattavan aaltoluvun (4.3) perusteella:

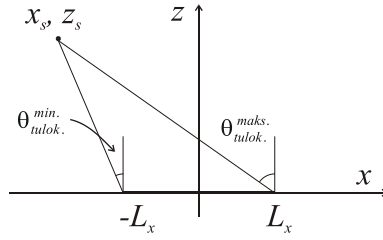
$$\Delta x = \frac{\pi}{k_{maks.}} = \frac{\pi}{0,266k} = \frac{\lambda}{2 \times 0,266} = \frac{0,97\text{mm}}{2 \times 0,266} \approx 1,8\text{mm} . \quad (4.5)$$

Teorian mukaisia referenssikentän tulokulmaa ja interferenssikuvion näytteistysväliä ei kuitenkaan käytännössä voida toteuttaa, sillä tasomaisen referenssikentän luominen ja sopivan kohteen valaisun järjestäminen pakottaa valitsemaan suuremman referenssikentän tulokulman ja samalla päädytään tiheämpään näytteistysväliin apertuurilla.

Käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä saadaan vaadittava referenssikentän tulokulma samoin kuin yllä, mutta nyt Gaussin keilan muotoisen referenssikentän tasoaaltospektrin leveys täytyy ottaa huomioon. Gaussin keilan tasoaaltospektriä voidaan approksimoida palloaallolla. Toisin kuin tasoaaltoreferenssin tapauksessa, käytettäessä palloaaltoreferenssiä, sen tasoaaltospektrin leveys apertuurilla riippuu referenssikentän lähteen etäisyydestä ja suunnasta. Spektri levenee lähteen etäisyyden pienentyessä ja lähteen suunnan lähestyessä apertuurin normaalia. Palloaallon voidaan ajatella kohtaavan apertuurin monella eri tulokulmalla. Pienin ja suurin mahdollinen tulokulma saadaan kuvasta 4.4:

$$\theta_{tulok.}^{min.} = \tan^{-1} \left(\frac{-L_x - x_p}{z_p} \right), \quad (4.6)$$

$$\theta_{tulok.}^{maks.} = \tan^{-1} \left(\frac{L_x - x_p}{z_p} \right). \quad (4.7)$$

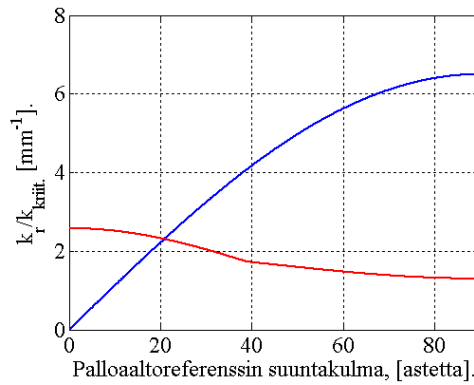


Kuva 4.4. Palloaallon lähteen sijainti apertuuriin nähden.

Tulokulmien (4.6) ja (4.7) avulla saadaan palloaallon muotoisen referenssikentän tasoaaltospektrin leveydeksi

$$B_r = \frac{k}{2} [\sin(\theta_{\text{tulok.}}^{\text{maks.}}) - \sin(\theta_{\text{tulok.}}^{\text{min.}})]. \quad (4.8)$$

Kuvaan 4.5 on piirretty referenssikentän tulosuuntaa vastaava aaltoluku ja kriittinen aaltoluku referenssikentän suuntakulman funktiona. Referenssikentän lähteen etäisyys $r = 0,903$ m pidetään vakiona, ja apertuurin puolileveydeksi valitaan $L_x = 0,1$ m.



Kuva 4.5. Palloaaltolähteen suuntakulmaa vastaava aaltoluku (sinisellä) ja vaadittava kriittinen aaltoluku (punaisella).

Kuvasta 4.5 saadaan riittäväksi referenssikentän lähteen suuntakulmaksi noin $20,8^\circ$. Nyt tulokulmien ääriarvot ovat: $\theta_{\text{tulok.}}^{\text{min.}} = 15,0^\circ$ ja $\theta_{\text{tulok.}}^{\text{maks.}} = 26,8^\circ$, joiden perusteella saadaan referenssikentän tasoaaltospektrin leveys $B_r = 625 \frac{1}{\text{m}}$. Suurimmaksi mitattavaksi aaltoluvuksi saadaan

$$k_{\text{maks.}} = k_{\text{kriit.}} + B_r + B_k = 3499 \frac{1}{\text{m}} + 625 \frac{1}{\text{m}} + 0,067 \times 6497 \frac{1}{\text{m}} = 4560 \frac{1}{\text{m}}. \quad (4.9)$$

Näytteistysväliksi apertuurille saadaan

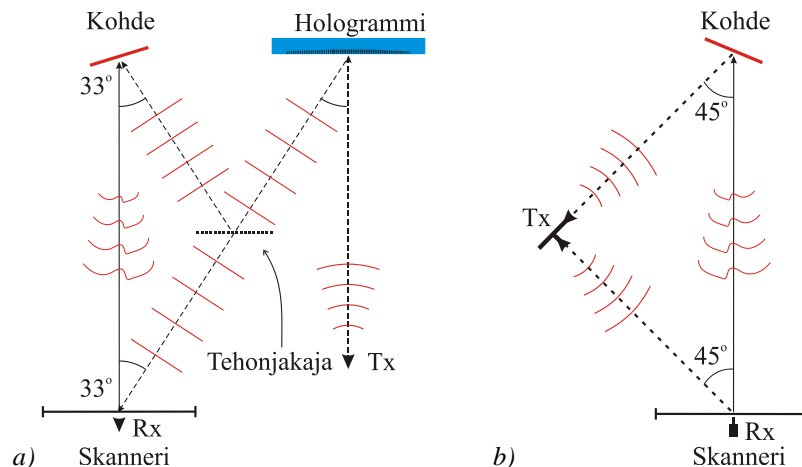
$$\Delta x = \frac{\pi}{k_{\text{maks.}}} = \frac{\pi}{4560 \frac{1}{\text{m}}} \approx 0,7 \text{ mm}. \quad (4.10)$$

Samoin kuin tasoaaltoreferenssillekin, yllä olevat referenssikentän suunta ja näytteistysväli ovat välttämättömiä ehtoja konvoluutitermien erottumiselle yhtälössä (3.50). Gaussin keilan muotoisen referenssikentän tasoaaltospektrin tilataajuuskaistanleveys kuitenkin pienenee referenssikentän tulokulman kasvaessa ($\theta_{tulok.}^{maks.}$ ja $\theta_{tulok.}^{min.}$ lähestyvät toisiaan), joka mahdollistaa suuremman referenssikulman käytön ilman, että suurin mitattava aaltoluku (4.9) kasvaisi. Referenssikentän tulokulmassa on siis hieman valinnanvaraa, vaikka tavoitteena onkin löytää mahdollisimman edullinen geometria. Tasoaaltoreferenssiä käytettäessä vain yksi geometria on edullisin. Sopivan valaisun saamiseksi ja käytettävissä olevan laitteiston takia päädytään kuitenkin suurempaan referenssikentän suuntakulmaan ja joudutaan käyttämään tiheämpää näytteistysväliä apertuurilla.

4.1.6 KOHTEEN VALAISU

Tässä työssä kokeiltiin kahta erilaista referenssikenttää: tasoaaltokenttää ja korrugoidun torven luomaa Gaussin keilaa. Piirrookset molemmista kuvausjärjestelyistä on esitetty kuvissa 4.6 a ja b.

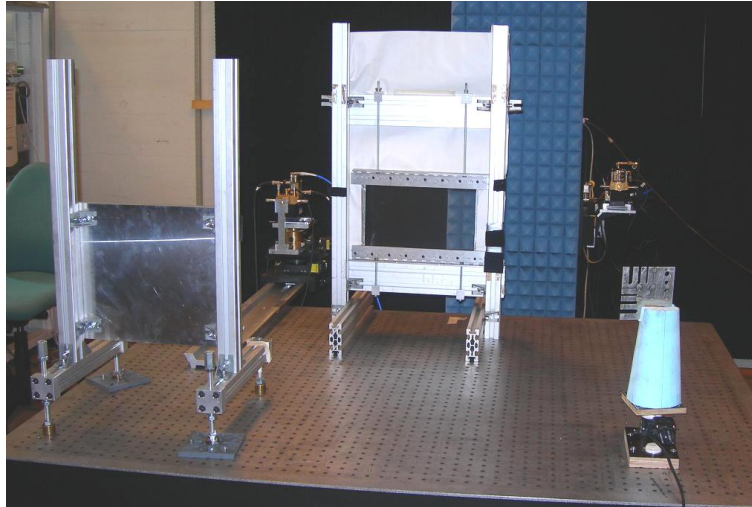
Kuvattava kohde ei voi olla huomattavan syvä ja sen tulisi olla apertuurin kanssa samansuuntainen, jotta kuva fokusoituisi oikein koko kohteen alalta. Kuvattavaa kohdetta on silti valaistava siten, että kohteesta heijastunut kenttä etenee apertuurille ja muodostaa interferenssikuvion referenssikentän kanssa. Myös referenssikentän käytännön toteutus asettaa lähtökohdan koko kuvauslaitteiston geometrialle. Jotta mitattavaan interferenssikuvion tehoon saadaan riittävästi kohdekentän vaikutusta, on tasomainen kohde tarkoituksella suunnattava kohti apertuuria peilimäisen heijastuksen aikaansaamiseksi. Tasomaisen kohteen ja apertuurin välinen kulma on siten noin 17° käytettäessä tasoaaltoreferenssiä ja noin 23° , kun referenssikenttänä on Gaussin keila.



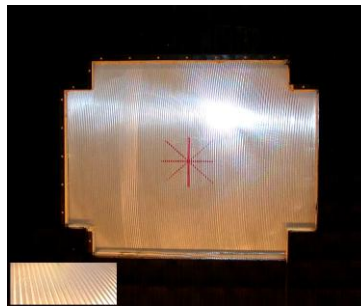
Kuva 4.6. a) tasoaaltoreferenssiin perustuva epäsuora holografinen kuvausjärjestely ja b) vastaava järjestely, kun Gaussin keilaa käytetään referenssikenttänä.

4.1.7 TASOMAINEN REFERENSSIKENTTÄ HEIJASTUSTYYPPISELLÄ VAIHEHOLOGRAMMILLA

Kuvassa 4.6 a on esitetty tasoaaltoreferenssiä käyttävä kuvausjärjestely. Valokuva järjestelystä on esitetty kuvassa 4.7, jossa kaikki metallipintoja peittävät absorbaattorit on poistettu havainnollisuuden vuoksi.



Kuva 4.7. Mittausjärjestely, kun referenssikenttänä oli tasoaalto. Heijastuksia vähentävät absorbaattorit on poistettu Etualalla: vaihehologrammi vasemmalla ja kuvattava kohde oikealla. Taka-alalla: vasemmalla lähetin (ESA-2), keskellä tehonjakaja ja oikealla vastaanotin (ESA-2).



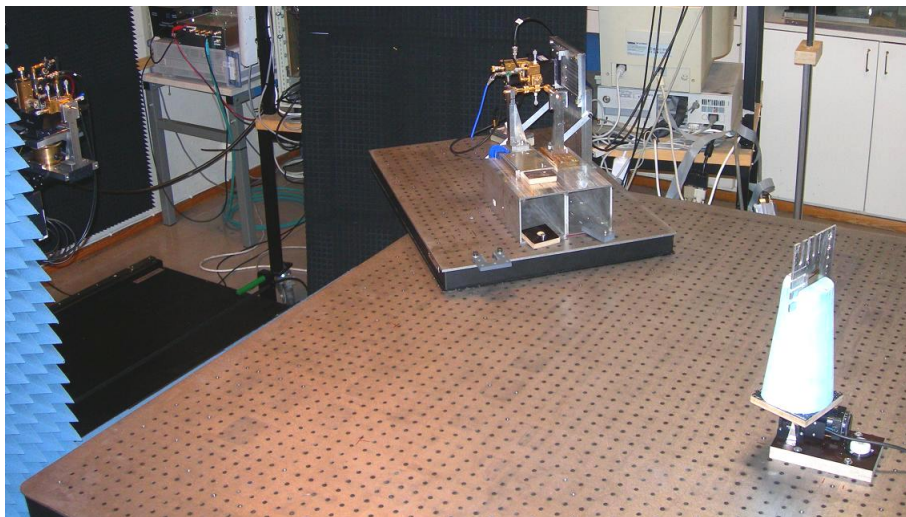
Kuva 4.8. Heijastustyyppinen vaihehologrammi. Hologrammi on ympäröity absorbaattorilla, jotta valaisukeila heijastuisi ainoastaan alueelta, jossa sen vaihetta moduloidaan urilla (ks. suurennus urista vasemmassa alakulmassa).

Tasoaalto luotiin heijastustyyppisellä vaihehologrammilla [41], joka on hilarakenteinen elementti. Vaihehologrammi moduloi sitä valaisevaa kenttää. Tässä tapauksessa vaihehologrammi moduloi kentän vaihetta siten, että valaistaessa sitä kohtisuoraan Gaussin keilalla, tasoaaltokenttä muodostuu vaihehologrammin pinnasta 33° asteen suuntaan vaihehologrammin normaaliin nähden. Valokuva käytetystä heijastustyyppisestä vaihehologrammista on esitetty kuvassa 4.8. Hologrammi on valmistettu alumiinista ja sen pintaan on koneistettu kaarevia uria, joiden paikka, syvyys ja leveys on suunniteltu siten, että haluttu tasoaaltokenttä syntyy. Vaihehologrammi on suunniteltu käytettäväksi siten, että lähetimen syöttötorven tulee olla yhden metrin etäisyydellä hologrammista. Tasoaaltokentän halkaisijaksi on suunniteltu 12 cm.

Vaihehologrammin luoma tasoaaltokenttä jaettiin -3 dB:n kvasioptisella tehonjakajalla, jolloin puolet tasoaaltokentän tehosta suunnattiin apertuurille ja puolet tehosta käytettiin valaisemaan kuvattavaa kohdetta. Tehonjakajana toimi $130\text{ }\mu\text{m}$ paksu polyesterikalvo, jonka läpäisy- ja heijastuskertoimet eri tulokulmilla ovat lähes samat 310 GHz :n taajuudella. Kalvo jännitettiin tukevaan metallikehikkoon ja asetettiin yhdensuuntaisesti hologrammin kanssa siten, että koko tasoaaltokenttä osuisi polyesterikalvolle. Tehonjakajan etäisyys hologrammista ja apertuurista oli yhtä suuri, jolloin kohteen paikka oli tehonjakajaan nähden symmetrinen vaihehologrammin kanssa. Tällä järjestelyllä sekä referenssi- että valaisukentän tulokulma apertuurille ja kohdetasolle oli 33° .

4.1.8 GAUSSIN KEILAN MUOTOINEN REFERENSSIKENTTÄ TORVIENTENNILLA

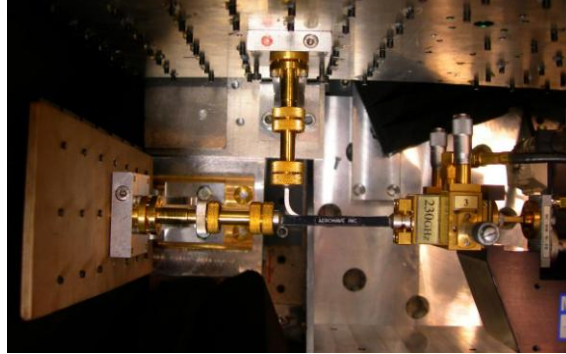
Holografista kuvausta kokeiltiin myös ilman tasomaista referenssikenttää. Tasoaaltokentän sijaan valaisu- ja referenssikentät olivat Gaussin keilan mukaiset. Käytetty mittaussjärjestely on esitetty kuvassa 4.6 b. Verrattuna tasoaallon luontiin, Gaussin keila on helpommin luotavissa; korrugoidun torviantennin keila on Gaussin keila. Käyttämällä Gaussin keilaa, kuvaussjärjestelyn vaatima tila pienenee, sillä tasoaaltokentän luominen vaatii fokusoivan elementin, joka on aina saadun tasoaaltokentän halkaisijaa suurempi. Gaussin keilalla on myös mahdollista käyttää suurempaa apertuuria kuvauksessa; puolen tehon leveys metrin päässä torvesta on noin 30 cm – vaihehologrammilla teho on keskittynyt halkaisijaltaan 12 cm :n alueelle. Samoin kuvaussjärjestelyn monimutkaisuus vähenee ja häviöt saadaan pienemmiksi, sillä heijastustyyppisten vaihehologrammien hyötysuhde on parhaimmillaan luokkaa -2 dB [41]. Valokuva mittaussjärjestelystä, kun heijastuksia vähentävät absorbaattorit on poistettu, on esitetty kuvassa 4.9.



Kuva 4.9. Mittaussjärjestely, kun Gaussin keilaa käytetään referenssikenttänä. Mittausaluetta peittävät absorbaattorit on poistettu. Vasemmalla vastaanotin, keskellä lähetin ja oikealla kohde.

Lähtetimen teho jaettiin valaisu- ja referenssikenttiin 10 dB suuntakytkimellä (kuva 4.10) siten, että kymmenesosa lähtetimen tehosta ohjattiin torviantenniin, joka muodosti Gaussin

keilan mukaisen referenssikentän. Valaisuun käytettiin samanlaista torviantennia suuntakytkimen toisessa ulostuloportissa. Suuntakytkimen portit ovat kohtisuorassa kulmassa toisiinsa nähden, joten referenssikenttä ja kohteen valaisu toteutettiin symmetrisesti siten, että lähtimen syöttö oli 45° kulmassa sekä apertuuriin että kohdetasoon nähden. Vastaanottimessa käytettiin avointa aaltoputkea antennina.



Kuva 4.10. Lähtimen tehonjakaja, kun Gaussin keilaa käytettiin referenssikenttänä. Lähtimen (oikealla) teho jaettiin valaisu- (vasemmalla) ja referenssikentän (ylhäällä) muodostaville korrugoiduille torviantenneille 10 dB:n suuntakytkimellä (musta-metallinhohtoinen, keskellä).

4.1.9 KOHTEEN SUUNTAUS

Kuvattava kohde asetettiin polystyreenipylvään päälle sille tehtyyn rakoon. Polystyreenin suhteellinen permittiivisyys on 1,048 taajuudella 310 GHz [45], joten sen oletettiin olevan millimetriaaltoalueella läpinäkyvä. Polystyreenipylväs asetettiin pyörittimen päälle, jolloin kohteen kulmaa apertuurin ja valaisukentän suuntaan nähden voitiin säätää. Kohteen suuntaamisen helpottamiseksi sen asentoa voitiin kallistaa pystysuuntaisen akselin suhteen.

4.1.10 VIRTUAALINEN APERTUURI

Vastaanotin asetettiin tasoskanneriin, joka liikutti vastaanotinta apertuuria vastaavan alueen yli. Etäisyys tasoskannerilta kohteelle oli 1,5 m. Skannausaluetta tasoaaltoreferenssiä käytettäessä rajoitti tehonjakajan reuna. Tasoskanneria voitiin liikuttaa 0,3 m skannausalueen keskipisteestä ennen kuin tehonjakajan reuna oli suoraan vastaanottimen edessä. Toisaalta tasoaaltokentän halkaisija oli noin 12 cm, jolloin se rajoittaa myös skannausalueen noin $10 \times 10 \text{ cm}^2$:een. Käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä, skannaus alueen koko saattoi olla $40 \times 40 \text{ cm}^2$, ennen kuin vastaanottimen ja kohteen välinen näköyhteys katkesi.

4.2 KUVANMUODOSTUSALGORITMI

Kuvaus toteutettiin kahdella tavalla: a) kohdekentän vaihe palautettiin epäsuoralla holografisella menetelmällä mitatusta interferenssikuvioista, b) ja käyttäen suoraan mitattua vaihetta. Käytettäessä suoraan mitattua vaihetta, referenssikentän vaikutus mitattuun kenttään voidaan poistaa suodattamalla se pois mitatun kentän tasoaaltospektristä.

Jälkimmäisen menetelmän tuottama kuva toimii siten vertailukohtana, kun arvioidaan epäsuoran holografisen menetelmän vaiheen palautuksen onnistumista.

4.2.1 FFT JA IKKUNOINTI

Kuvaukseen liittyy Fourier-muunnoksen tekeminen mitatusta interferenssikuvioista ja sähkökentästä. Sähkökenttää näytteistetään diskreeteissä pisteissä suorakulmaisessa apertuurissa, jolloin muunnoksissa käytetään *Fast Fourier Transform* -algoritmia. Algoritmin ominaisuuksiin kuuluu, että muunnettavan signaalin oletetaan olevan jaksollinen ja mitatulle välille oletetaan täsmälleen kokonaislukumäärä jaksoja [46]. Mikäli jaksollisuusehto ei todellisuudessa toteudu, syntyy epäjatkuvuus, joka näkyy FFT-spektrissä laajakaistaisena komponenttina. Mitattaessa satunnaisten kohteiden heijastamaa kenttää, on hyvin epätodennäköistä, että kentän teho saisi saman arvon apertuurin vastakkaisilla reunoilla.

Ongelma voidaan kiertää käyttämällä ikkunointia, jolloin mitattua kenttajakautaa kerrotaan funktiolla, joka pienenee jatkuvasti maksimiarvostaan nollaan edettäessä mittausalueen keskeltä reunoille. Näin mitattu kenttä näyttää jaksolliselta, koska sillä on mittausalueen alussa ja lopussa sama arvo. Ikkunoinnin haittana on kuvan erotuskyvyn heikkeneminen, sillä ikkunointi vaimentaa usein myös mitatun kentän (tai interferenssikuvion) piirteitä apertuurin laidalla. Ikkunoinnin vaikutus voidaan ajatella apertuurin pienenemiseksi.

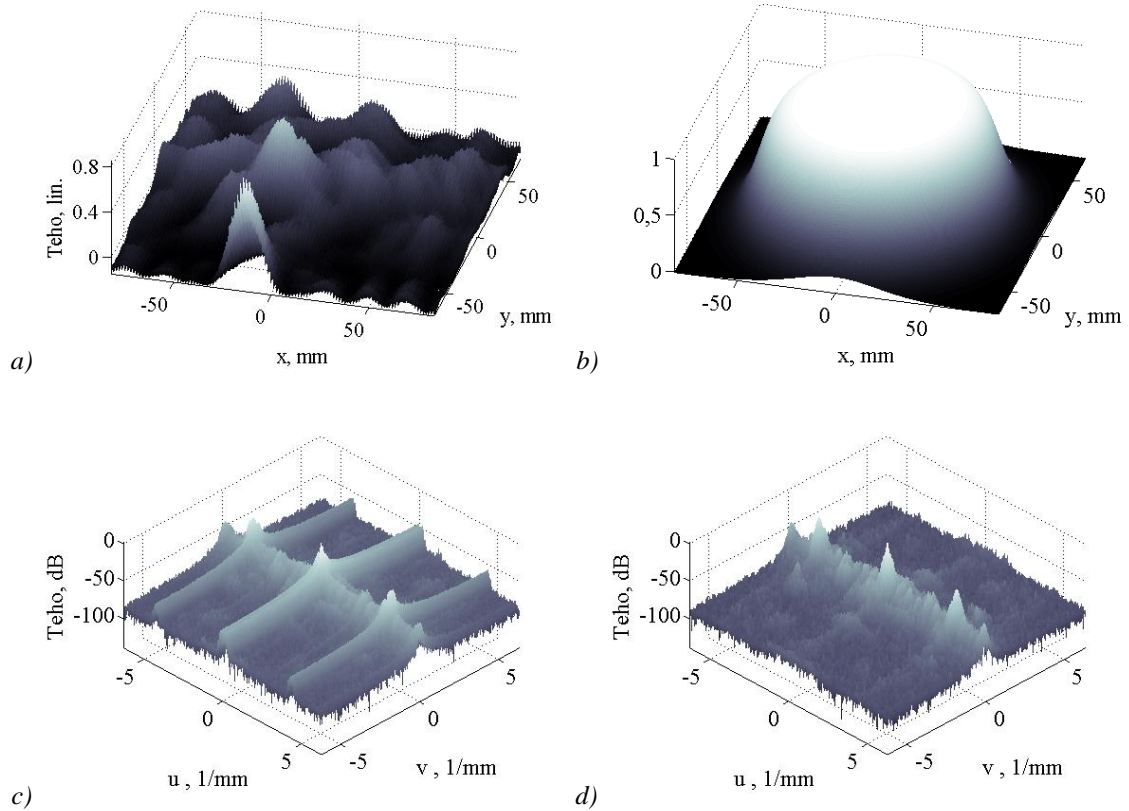
Työssä käytettiin Butterworth-tyyppistä ikkunafunktiota, joka on muotoa

$$H(i, j) = \frac{1}{1 + (D_B(i, j)/D_0)^{2p}}, \quad (4.11)$$

jossa D_0 on se etäisyys apertuurin keskeltä, jolloin H on pienentynyt puoleen maksimiarvostaan. Parametri p on ikkunafunktion asteluku, joka kuvaa H arvon pienentymisen jyrkkyyttä, kun siirrytään apertuurin keskeltä reunalle. Etäisyys $D_B(i, j)$ on

$$D_B(i, j) = \sqrt{(i - M/2)^2 + (j - N/2)^2}. \quad (4.12)$$

Kuvassa 4.11 a on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, kun kohteena käytettiin kuvan 5.11 mukaista metallilevyä. Interferenssikuvioista on vähennetty sen keskiarvo. Kuten huomataan, interferenssikuvio levittäytyy myös apertuurin alueen ulkopuolelle. Kuvassa 4.11 b on esitetty ikkunointifunktio, kun $D_0 = 6$ cm ja $p = 12$. Ikkunointifunktion vaikutus näkyy kuvista 4.11 c ja d joissa spektri (3.50) on laskettu käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä. Ikkunointifunktiolla on merkitystä erityisesti käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä, sillä tasoaaltoreferenssin halkaisijaltaan 12 cm keilan teho laskee voimakkaasti keilan ulkopuolella, jolloin kentän taperointi tapahtuu tasoaaltoreferenssillä automaattisesti.



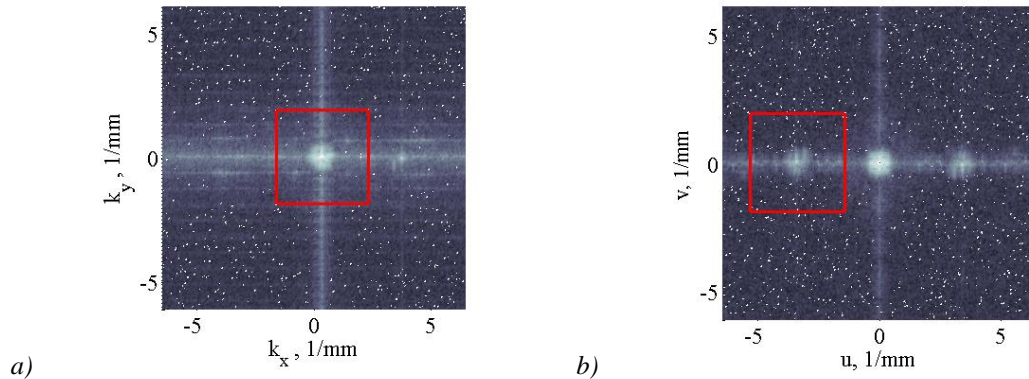
Kuva 4.11. a) Apertuurilla mitattu interferenssikuvio, b) Butterworth-tyyppinen ikkunointifunktio, c) spektri (3.50) ilman ikkunointia ja d) spektri (3.50) ikkunoinnin kanssa.

4.2.2 KOHDEKENTÄN PALAUTUS

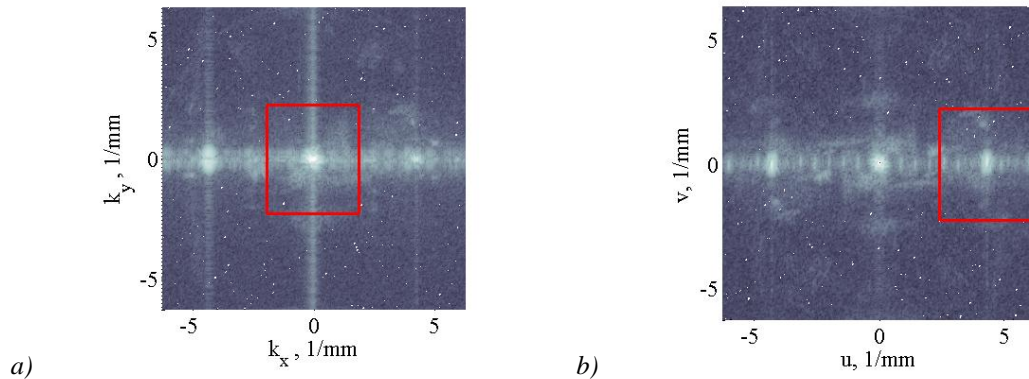
Kuvausalgoritmiin liittyy spektrin suodattaminen, kun haluttu konvoluutiotermi erotetaan spektristä (3.50) tai kun referenssikentän vaikutus halutaan poistaa tasoaaltospektristä (3.41). Suodattaminen toteutettiin yksinkertaisella neliöfunktiolla, jossa halutun spektrikomponentin keskipiste on neliön keskellä. Suodatuksessa neliön ulkopuolelle jäävä spektrin osa asetetaan nollassi. Kuvassa 4.12 a on mitattu tasoaaltospektri, kun käytettiin tasoaaltoreferenssiä ja kohde oli kuvan 5.11 mukainen alumiininen testikuvio. Kuvassa kohdetta vastaava osa spektristä on neliöity punaisella. Kohteen spektristä oikeaan näkyy hieman heikompana tasoaaltokomponentti, joka vastaa referenssikenttää. Kuva 4.12 b esittää samassa tilanteessa mitatun tehon spektriä. Spektri on jakautunut erillisiin komponentteihin yhtälön (3.50) mukaisesti. Nyt spektristä valitaan (neliöity punaisella) komponentti, joka vastaa kohdekentän tasoaaltospektrin konvolvoimista referenssikentän konjugaatilla. Neliöidyn alueen sisältö on ideaalisessa tapauksessa vakiolla kertomista vaille sama kuvissa 4.12 a ja b. Kohdekentän tasoaaltospektri siis teoriassa saadaan, kun kuvan 4.12 b neliöity osa viedään keskelle spektriä, jonka arvo muualla on nolla.

Käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä, tasoaaltospektri ja tehon spektri ovat kuvan 4.13 a ja b mukaiset. Nyt spektrikomponentit ovat levinneet enemmän kuin tasoaaltoa käytettäessä, sillä Gaussin keilan tasoaaltospektri on leveämpi kuin teoriassa

impulssimainen tasoallon spektri. Gaussin keilalla konvoluutiotermistä ei saada kohdekentän tasoaltospektriä siirtämällä sitä spektrin keskelle, vaan kohdekenttä saadaan spektristä dekonvoluimalla yhtälön (3.52) mukaisesti. Dekonvoluutio kohdistetaan ainoastaan kuvan 4.13 b spektrissä neliöidylle alueelle, joten muu osa spektristä suodatetaan pois ennen dekonvoluutiota. Referenssikentän amplitudi ja vaihe mitataan erikseen ilman kohdetta tai niitä simuloidaan, jotta dekonvoluutio voidaan suorittaa.



Kuva 4.12. Kuvaukseen liittyvät spektrit käytettäessä tasoaltoreferenssiä: a) tasoaltospektri (3.41) kuvattaessa hyvin heijastavaa kohdetta b) tehon spektri (3.50) samassa tilanteessa.

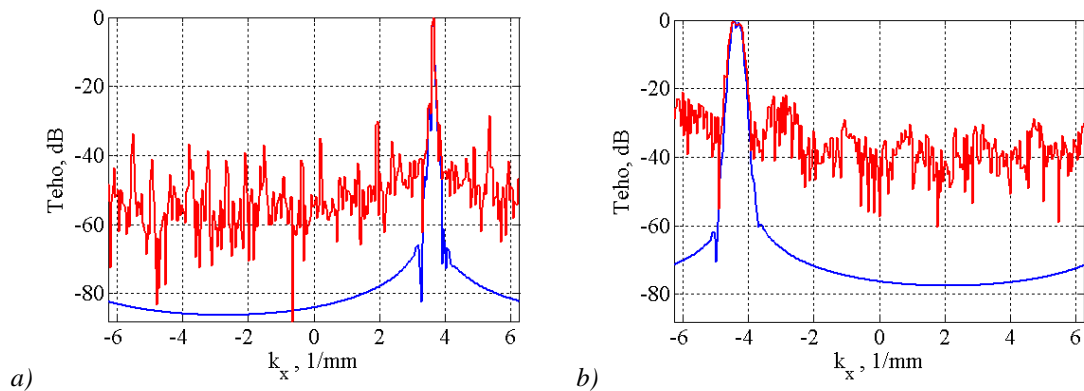


Kuva 4.13. Kuvaukseen liittyvät spektrit käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä: a) tasoaltospektri (3.41) kuvattaessa hyvin heijastavaa kohdetta, b) tehon spektri (3.50) samassa tilanteessa.

Konvoluutiotermien leveyttä spektrissä (3.50) voidaan arvioida, sillä kohteen etäisyys ja suurin koko tiedetään. Konvoluutiotermin leveys spektrissä on referenssi- ja kohdekenttien leveyksien summa. Kohteen leveys spektrissä saadaan yhtälöstä (4.1), ja se on arviolta $B_k \approx 435\text{m}^{-1}$.

Referenssikenttien tasoaltospektrien k_x -komponentit on esitetty kuvissa 4.14 a ja b, kun kenttä on mitattu $17 \times 14 \text{ cm}^2$ alueessa $0,5 \text{ mm:n}$ näytevälillä. Mittausta vastaava simuloitu tasoaltospektri on esitetty sinisellä ja mitattu spektri punaisella. Kenttiin sovellettiin edellä esiteltyä ikkunointifunktiota. Referenssikenttien simuloitua ja mitattua tasoaltospektrien esitetään liitteessä A k_x-k_y -koordinaatistossa. Huomataan, että mitatut referenssikenttien tasoaltospektrit seuraavat hyvin simulaatiota referenssikentän tulosuuntaa vastaavassa

osassa spektriä. Siirryttäessä spektrissä pois referenssikenttien tulosuuntaa vastaavalta alueelta, simuloitujen spektrien taso laskee nopeasti erittäin pieneksi. Näin ei käy mitatun spektrin kanssa. Tasoaaltoreferenssillä mitatun spektrin taso on noin -45 dB kentän tulosuunnan lähistöllä ja laskee noin -55 dB:iin muualla. Käytettäessä Gaussin keilaa, spektrin taso on noin -30 dB keilan tulosuunnan lähellä ja laskee noin -40 dB:iin muualla. Jos se osa spektristä, joka poikkeaa simulaation tasosta ajatellaan mittauksessa olevaksi kohinaksi, saadaan mitattujen spektrien perusteella referenssikenttien tilaspektrien leveyksiksi $B_r = 220\text{m}^{-1}$ tasoaaltoreferenssille ja $B_r = 415\text{m}^{-1}$ Gaussin keilalle. B_k ja B_r ovat spektrien puolileveyksiä viitteen [38] mukaan. Konvoluutiotermien leveyksiksi saadaan 655m^{-1} tasoaaltoreferenssillä ja 850m^{-1} , kun referenssikenttänä on Gaussin keila. Kuvissa 4.12 b ja 4.13 b esitetyt suodatuksot valitaan siten, että ne kattavat yllä lasketut konvoluutiotermien spektrien leveydet.



Kuva 4.14. Referenssikentän simuloitu (sinisellä) ja mitattu (punaisella) tasoaaltospektri
a) tasoaaltoreferenssille ja b) Gaussin keilalle.

4.2.3 KUVAN REKONSTRUKTIO

Kun kohteesta heijastuneen kentän tasoaaltospektri apertuurilla on saatu, lasketaan kenttä kohteen pinnalla yhtälön (3.42) mukaisesti. Saatu kenttä on kohteesta rekonstruoitu kuva. Kohdetta voidaan tarkastella lasketun kentän amplitudin tai vaiheen perusteella. Tässä työssä ei saatu kuvaa kohteen heijastuskertoimesta (yhtälöstä 2.13), sillä valaisukentän tarkkaa muotoa ei tunnettu, lisäksi vino valaisukentän tulokulma kohteen pintaan ja korkea taajuus aiheuttavat saatuun vaihekuvaan nopean vaiheen muutoksen, joka tuottaa vaikeasti tulkittavan kuvan eikä tuo lisäinformaatiota amplitudikuviin verrattuna. Vaihekuvia ei siten tässä työssä esitetä.

5 MILLIMETRIAALTOKUVAT

Tässä luvussa käsitellään saatuja millimetriaaltokuvia. Eri referenssikenttien soveltuvuutta holografiseen kuvaukseen arvioidaan saatujen kuvien perusteella. Kuvista määritellään saavutettu erotuskyky sekä kuvan kirkkauden dynaaminen alue ja arvioidaan millaisia vaatimuksia, kuten kuinka suuri lähetin/vastaanottimen signaali-kohina –suhde (SNR, *signal-to-noise-ratio*) tarvitaan pienten yksityiskohtien havaitsemiseksi. Kuvauksessa käytetty vektoripiirianalysaattori mahdollisti vaiheen mittaamisen myös suoraan, joten kuvaus toteutettiin myös suoraan mitatun vaiheen avulla. Tällöin epäsuoraa holografista kuvausta voitiin verrata menetelmään, jossa kentän vaiheen palautusta ei tehdä.

Lopuksi pohditaan erilaisia menetelmiä, joilla saatua kuvaa voitaisiin parantaa. Kuvausalgoritmi, joka etsii esimerkiksi epäjatkuvuuksia kuvan kirkkaudessa tai korostaa tiettyä kirkkausaluetta, voi tuoda esille lisää yksityiskohtia kohteesta. Kuvien laatua voidaan parantaa myös perinteisin kuvankäsittelyn keinoin, jolloin saadun kuvan laatua tulkitaan subjektiivisesti.

Millimetriaaltokuvat on otettu 310 GHz:llä pystypolarisaatiolla. Skannausalue kussakin tapauksessa on yhtä suuri kuin saadun kuvan koko (ilmoitettu kuvien akseleilla). Kentän näytteistysväli on 0,5 mm sekä x - että y -suunnassa, ellei toisin mainita. Käytetystä vektoripiirianalysaattorin integrointiajasta ja skannerin rajoitetusta ajonopeudesta johtuen yhden kuvan ottaminen kesti tunteja, jolloin laitteistossa mahdollisesti tapahtuva vaiheen ryömintä voi vaikuttaa suoran holografisen kuvauksen lopputulokseen.

Kuvat saadaan kohteesta heijastuvan kentän amplitudin perusteella. Kuvissa esitetään kohteen kirkkaus, joka määritellään

$$B = 1 - \frac{|\mathbf{E}_k|}{\max |\mathbf{E}_k|}, \quad (5.1)$$

jolloin kuvan vaaleimmassa kohdassa ei ole heijastunutta kenttää ja tummin kohta merkitsee voimakkainta heijastusta.

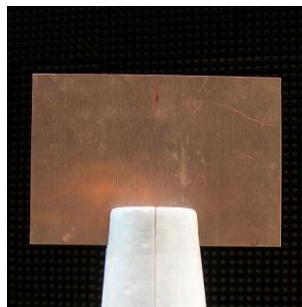
Tässä kappaleessa esitellään vain saadut millimetriaaltokuvat, kunkin kohteen tapauksessa mitattu tasoaaltospektri (3.41), tehon spektri (3.50), ja interferenssikuvio (3.43) esitetään liitteissä.

5.1 REFERENSSIKENTTÄNÄ TASOAALTO

5.1.1 TYHJÄ KUVAAUSALUE JA ALUMIININEN SUORAKAIDE

Kuvauksen tarkoituksena on määrittää kuvausmenetelmien dynaaminen alue, suurin ero tumman ja vaalean välillä millimetriaaltokuvassa. Kirkkauden dynaaminen alue saadaan selville kuvaamalla tyhjää kuvausaluetta, ja vertaamalla saadun kuvan keskimääräistä tasoa kuvaan, joka on otettu alumiinilevystä. Alumiinilevy asetettuna polystyreenipylvään päähän kuvausalueelle on esitetty kuvassa 5.1.

Kuvausmenetelmiä testattiin ensin siten, ettei kuvattavana ollut lainkaan kohdetta, vaan tyhjä, absorbaattoreilla peitetty mittaustila. Myös kuvattavan kohteen jalustana käytetty polystyreenipylväs oli poistettu. Epäsuoralla holografisella menetelmällä saatu kuva on esitetty kuvassa 5.2 a ja suoraan mitattua vaihetta käytettäessä saatu kuva on esitetty kuvassa 5.2 b. Mittauksen jälkeen polystyreenipylväs asetettiin paikoilleen, ja kuvaus uusittiin. Mitatut interferenssikuviot, tasoaaltospektrit ja tehon spektrit on esitetty liitteessä B ja C. Kuvauksen tulokset polystyreenipylvään kanssa on esitetty kuvissa 5.2 c ja d. Millimetriaaltokuvat $13 \times 17 \text{ cm}^2$ alumiinilevystä on esitetty kuvissa 5.2 e ja f. Mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä D. Nyt kuvia ei ole normalisoitu kirkkauteen (5.2), jotta eri menetelmillä ja eri kohteilla otettuja kuvia voidaan verrata keskenään.



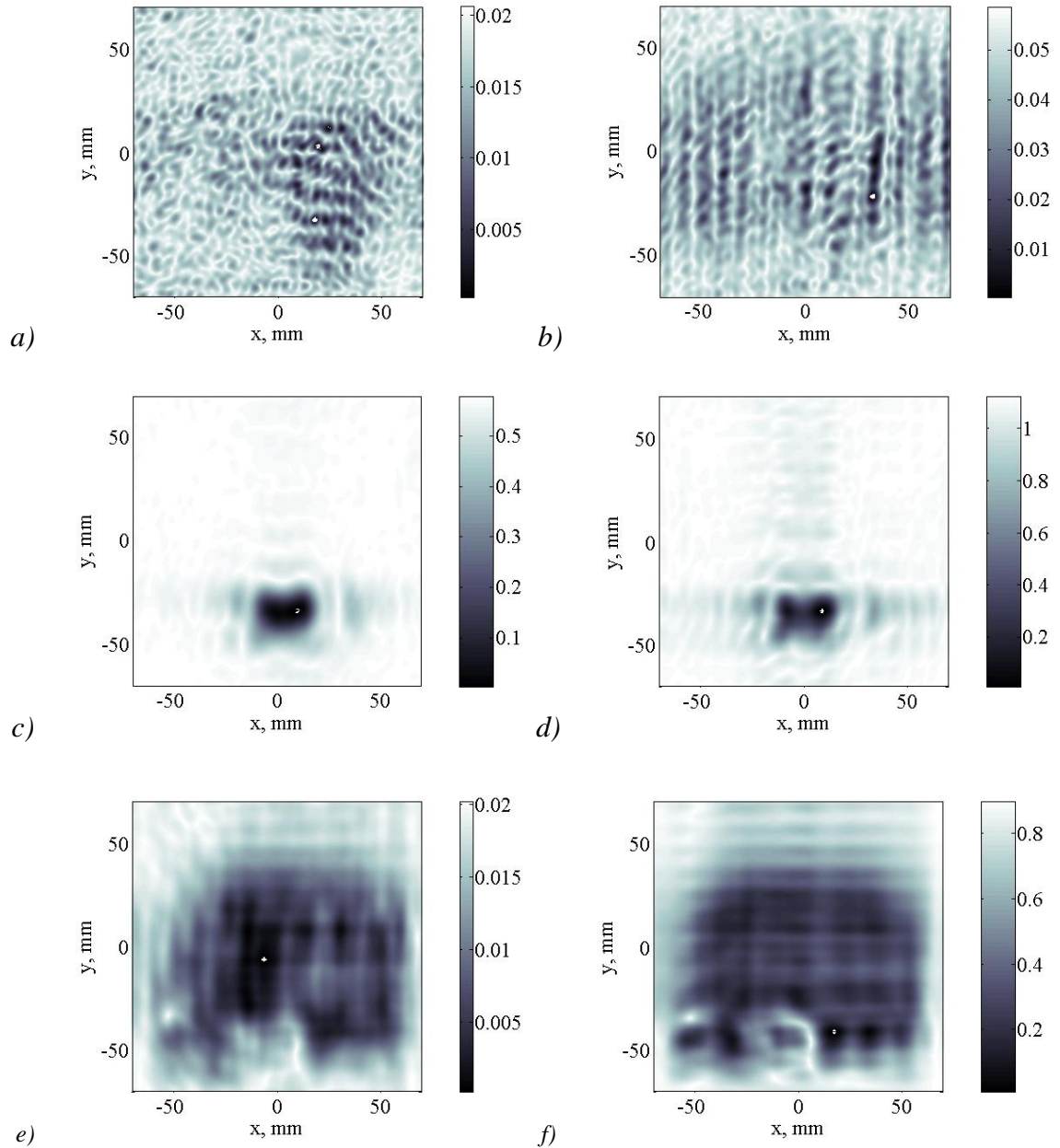
Kuva 5.1. Alumiinilevy ($13 \times 17 \text{ cm}^2$) tuettuna polystyreenipylvään päähän. Alumiinilevyn voitiin määrittää millimetriaaltokuvan kirkkauden dynaaminen alue.

Molemmat, sekä epäsuora että suora menetelmä tuottavat kohinan kaltaisen kuvan, kun kuvausalueella ei ole kohdetta. Kohinan lisäksi epäsuoralla menetelmällä otetussa kuvassa on alue, joka on keskimäärin muita alueita tummempi. Samoin suoralla menetelmällä otetussa kuvassa on tummempi alue, joka jatkuu jaksollisena koko kuvan yli.

Kun polystyreenipylväs asetetaan kuvausalueelle, se näkyy selvästi molemmilla menetelmillä otetuissa kuvissa. Suoralla menetelmällä pylvään kuvassa on enemmän piirteitä kuin kuvattaessa epäsuoralla menetelmällä. Toisaalta, suora menetelmä tuottaa kuvaan aaltoilua, joka vaimenee pylvästä etäännyttäessä.

Alumiinilevyn oikean alalaidan ääriiviivat näkyvät hyvin molemmilla menetelmillä otetuissa kuvissa. Alumiinilevyn koko on suurempi kuin valaisukeila, joten levyn yläreunat

näyttävät pyöristyneen millimetriaaltokuvissa. Todellisuudessa pyöristyminen johtuu ellipsin muotoisesta valaisukeilasta. Keskellä alumiinilevyn alareunaa näkyy polystyreenipylvään vaikutus kuvaan. Pylväs ei kuitenkaan näytä samalta kuvissa 5.2 c ja 5.2 e, vaan pylvään vaikutus on juuri päinvastainen: pylväs alumiinilevyn edessä vähentää heijastusta.

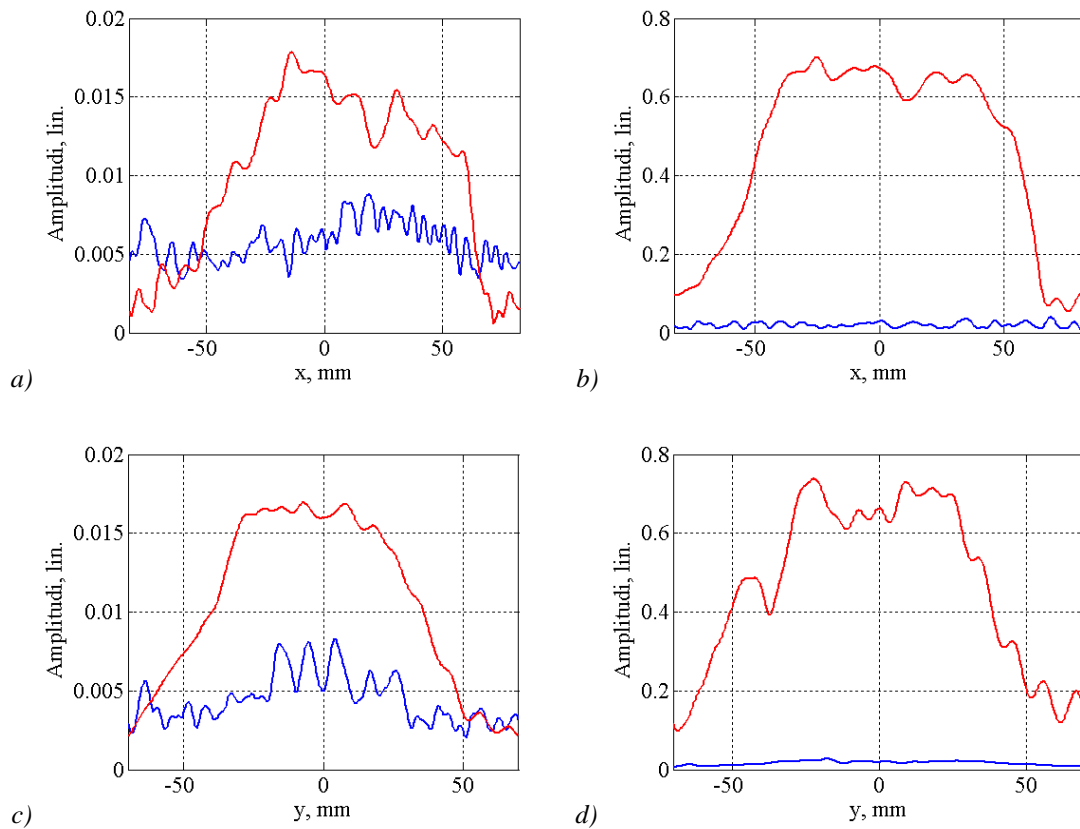


Kuva 5.2. Millimetriaaltokuvat epäsuoralla (vasemmalla) ja suoralla (oikealla) holografisella menetelmällä. a, b) tyhjä kuvausalue, c, d) polystyreenipylväs ja e, f) alumiinilevy.

Kuvien dynaaminen alue voidaan määrittää kahdesta kuvasta: toisessa ei käytetä kohdetta ollenkaan ja toisessa on kohteena mahdollisimman hyvin heijastava alumiinilevy. Kuvissa 5.3 a ja c on esitetty keskiarvoiset poikkileikkaukset epäsuoralla menetelmällä saaduista kuvista 5.2 a ja e. Vastaavasti kuvissa 5.3 b ja d on keskiarvoiset poikkileikkaukset suoralla

menetelmällä saaduista kuvista. Keskiarvoinen poikkileikkaus vaakasuunnassa on vaakasuuntaisten poikkileikkausten keskiarvo alueelta, jossa $y = -20 \text{ mm} - 20 \text{ mm}$. Pystysuuntaiset poikkileikkaukset saadaan samalla tavalla alueelta, jossa $x = -20 \text{ mm} - 20 \text{ mm}$.

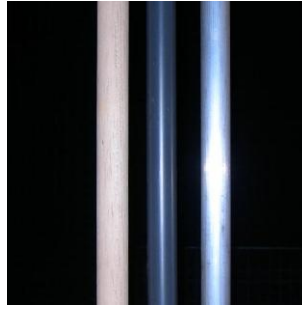
Kirkkaus alumiinilevyllä ja ilman on epäsuoralla menetelmällä noin 0,016 ja 0,006, kun suoralla menetelmällä vastaaviksi luvuiksi saadaan 0,67 ja 0,025. Epäsuoralla menetelmällä dynaaminen alue on siten noin 8,6 dB. Suoran menetelmän dynaamiseksi alueeksi saadaan noin 28,6 dB. Suoralla kuvauksella saatu dynaaminen alue on siis kymmenkertainen epäsuoraan menetelmään verrattuna.



Kuva 5.3. Keskimääräiset poikkileikkaukset kuvattaessa alumiinista suorakaidetta (punainen) ja tyhjää kuvausaluetta (sininen) epäsuoralla (a ja c) ja suoralla (b ja d) holografisella menetelmällä.

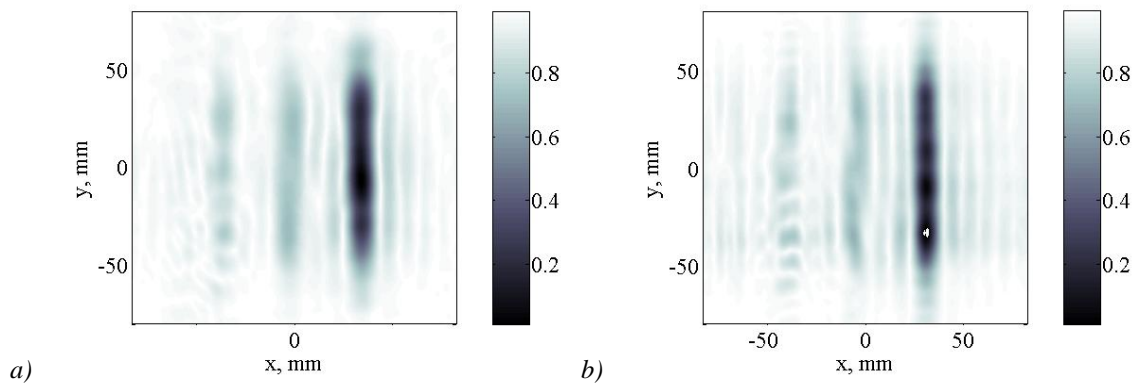
5.1.2 METALLI-, MUOVI- JA PUUTANKO

Kuvauksen tarkoituksena on selvittää, kuinka erilaiset materiaalit näkyvät millimetriaaltokuvassa. Kuvattavan kohteen materiaaleiksi valittiin alumiini, polyvinyylikloridi (PVC-muovi) ja puu. Materiaalit oli muokattu tangoiksi, jotka asetettiin pystyyn kuvausalueelle. Tankojen halkaisija on 20 mm, ja niiden välinen etäisyys on 45 mm. Tangot on esitetty kuvassa 5.4.



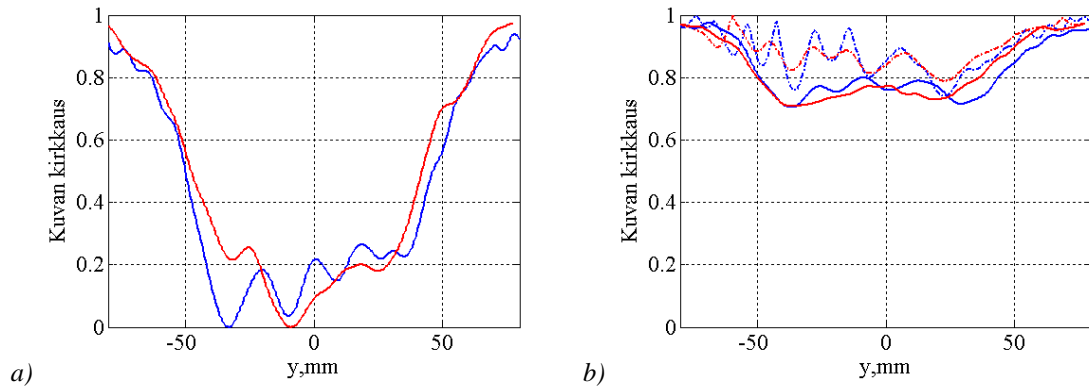
Kuva 5.4. Vasemmalta lukien: puu-, PVC-muovi- ja alumiinitangot.

Kuvissa 5.5 a ja b on esitetty millimetriaaltokuvat tangoista. Kuvat esittävät kirkkautta (5.2). Kuvausalgoritmissa ei käytetty ikkunointia (4.11). Mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä E. Vaikka tangot ovat pitkiä, ja ulottuvat koko kuva-alueen yli, halkaisijaltaan 12 cm:n valaisu osuu vain tankojen keskikohtaan, eivätkä tangot siten ulotu millimetriaaltokuvassa koko kuva-alan yli. Kaikki tangot ovat sekä epäsuoralla että suoralla menetelmällä tunnistettavissa, mutta tankojen välisessä alueessa näkyy aaltoilua. Epäsuoralla menetelmällä otetussa kuvassa aaltoilu on hieman vaimeampaa.



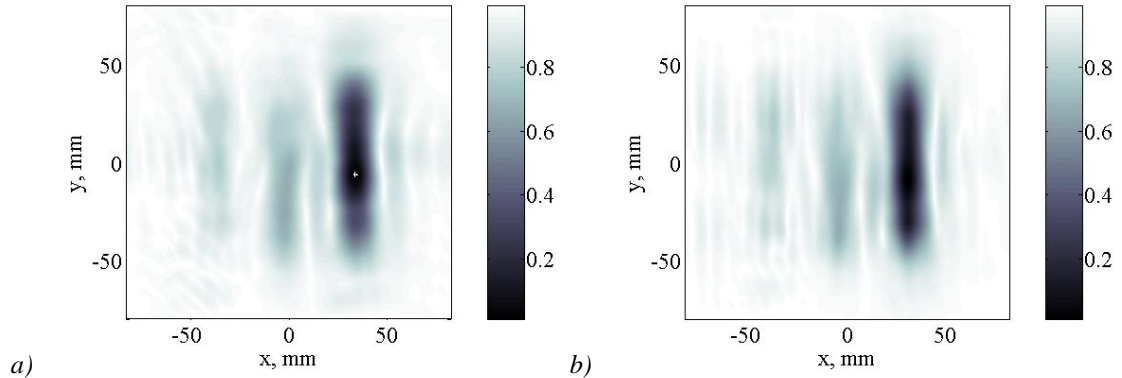
Kuva 5.5. Millimetriaaltokuvat tangoista a) epäsuoralla ja b) suoralla holografisella menetelmällä.

Kuvassa 5.6 a on poikkileikkaukset kuvan 5.5 a kirkkaudesta metallitangon keskikohtaa pitkin. Kuvan tummin kohta saadaan odotetusti metallitangon kohdalla. Kuvan kirkkaus vaihtelee metallitangon matkalla, suoralla menetelmällä kuvattuna metallitangon kirkkauden vaihtelu on hieman suurempaa kuin epäsuoraa menetelmää käytettäessä. Kuvassa 5.6 b on poikkileikkaukset PVC- ja puutankojen keskikohtaa myöden. PVC-tangon kirkkaus on suhteellisen tasainen läpi koko kuvan, ja eri menetelmien antamat kirkkaudet poikkeavat toisistaan vain vähän. Millimetriaaltokuvassa himmeämpänä näkyvän puutangon kirkkaus vaihtelee voimakkaasti eri kohdissa tankoa. Puutangon kohdalla eri menetelmät eroavat hieman; suoralla menetelmällä puun kirkkauden vaihtelut ovat osin suurempia.



Kuva 5.6. Poikkileikkaus kuvattaessa tankoja epäsuoralla (punainen) ja suoralla (sininen) holografisella menetelmällä. a) poikkileikkaus metallitangon keskikohtaa pitkin ja b) poikkileikkaukset PVC- (kiinteä viiva) ja puutangon (katkoviiva) keskikohtaa pitkin.

Kuvissa 5.5 a ja b esiintyvä aaltoilu johtuu mahdollisesti katkaisuvirheestä spektrissä (3.40). Käyttämällä ikkunointia, aaltoilua voidaan vähentää. Kuvassa 5.7 a ja b on esitetty ikkunoinnin avulla saadut millimetriaaltokuvat. Käytettäessä ikkunointia, mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä F. Samalla, kun aaltoilu on hieman vähentynyt ikkunoinnin ansiosta, tankojen leveys on kasvanut – kuvaten apertuurin pienenemisen takia huonontunutta erotuskykyä. Ikkunoinnin vaikutus näkyy erityisesti mitatuissa tasoaaltospektreissä (vrt. liite E, kuva E.1 b ja liite F, kuva F.1 b).



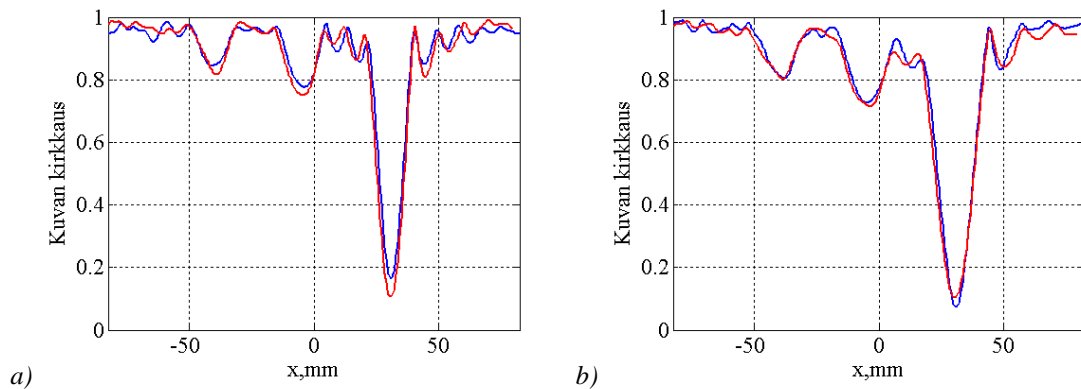
Kuva 5.7. Millimetriaaltokuvat tangoista a) epäsuoralla ja b) suoralla holografisella menetelmällä, kun mitattuun interferenssikuvioon ja sähkökenttään sovelletaan ikkunointia.

Kuvassa 5.8 a on esitetty vaakasuuntainen keskimääräinen poikkileikkaus, jossa on laskettu kuvan kirkkauden keskiarvo alueessa $y = -20 \text{ mm} - 20 \text{ mm}$. Poikkileikkauksesta nähdään, että PVC-tangon heijastaman kentän ja alumiinin heijastaman kentän amplitudien suhde (heijastuskerroin) on $0,27 \dots 0,28$, riippuen käytetystä kuvausmenetelmästä. PVC:n suhteellinen permittiivisyys on noin 3 [47], joten laskemalla sen kohtisuoraksi heijastuskertoimeksi saadaan

$$\rho_{PVC} = \frac{\sqrt{\mu_0}/\sqrt{\varepsilon_0} - \sqrt{\mu_1}/\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\mu_0}/\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\mu_1}/\sqrt{\varepsilon_1}} = \frac{1-1/\sqrt{3}}{1+1/\sqrt{3}} \approx 0,27, \quad (5.2)$$

joka on lähellä kuvasta määritettyä heijastuskerrointa. Puun heijastuskertoimeksi saadaan samalla menetelmällä 0,19...0,21.

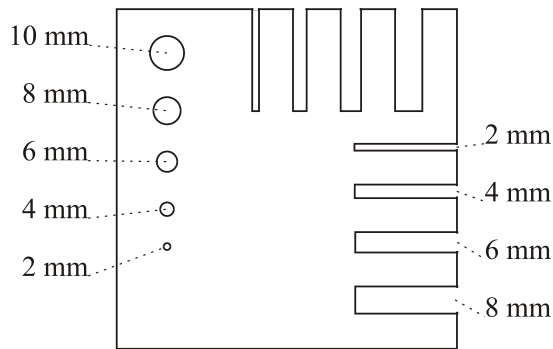
Erotuskyvyn huonontuminen nähdään helposti keskimääräisistä poikkileikkauksista kuvissa 5.8 a ja b. Poikkileikkaukset on tehty samalla tavalla kuin kuvissa 5.3 a–c. Ilman ikkunointia tankojen leveydet millimetriaaltokuvissa ovat 17 mm (puu), 19 mm (PVC) ja 20 mm (alumiini), kun tangon reunan katsotaan alkaneen kirkkauden pudottua 0,95:n tasolle. Kun ikkunointia käytetään, leveyksiksi saadaan 23 mm (puu), 26 mm (PVC) ja 28 mm (alumiini). Poikkileikkaus osoittaa aaltoilun hieman vähentyneen ikkunoinnin ansiosta.



Kuva 5.8. Keskimääräiset poikkileikkaukset kuvattaessa tankoja epäsuoralla (punainen) ja suoralla (sininen) holografisella menetelmällä. a) poikkileikkaus, kun ikkunointia ei käytetä ja b) poikkileikkaus, kun ikkunointi on käytössä.

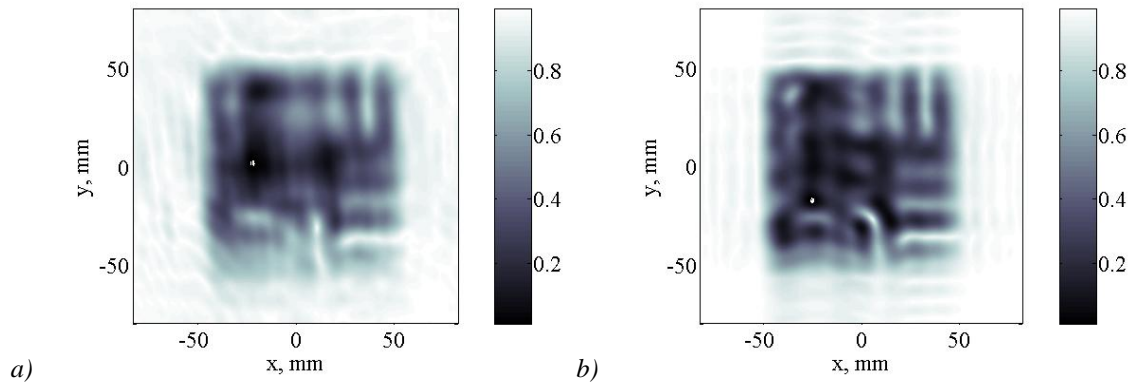
5.1.3 TESTIKUVIO

Kuvattavana kohteena käytettiin 100 x 100 mm² alumiinilevyä, johon on koneistettu erikokoisia rakoja ja reikiä. Kohteen yksityiskohtien koko muuttuu 10 mm:stä 2 mm:iin, jolloin kuvausmenetelmällä saatua erotuskykyä voidaan arvioida. Piirustus kohteesta on esitetty kuvassa 5.9. Levy käännettiin kulmaan, joka apertuuriin nähden oli referenssikentän tulokulmasta arviolta puolet, 17°. Levy ei siis ollut yhdensuuntainen apertuurin kanssa, mikä mahdollisesti lisäsi kuvan epätarkkuutta. Lisäksi levy näkyisi millimetriaaltokuvassa todellista hieman kapeampana. Epäsuoralla holografisella menetelmällä otettu millimetriaaltokuva on esitetty kuvassa 5.10 a. Kuvassa 5.10 b on esitetty kuva samasta kohteesta käyttäen suoraan mitattua vaihetta. Mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä G.



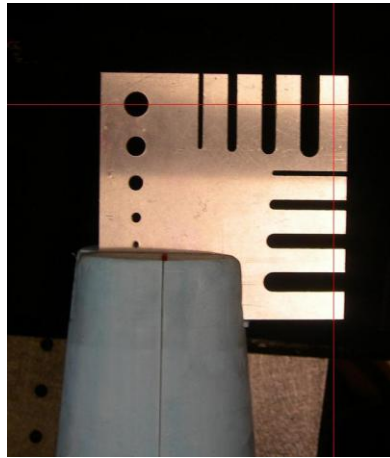
Kuva 5.9. Kuvauksessa käytetty testikuvio.

Kuvista nähdään, että epäsuoralla holografisella menetelmällä saatu kuva on epäselvempi kuin käytettäessä menetelmää, jossa vaihe on mitattu suoraan. Kohteen ulkomitat toistuvat molemmissa kuvissa melko hyvin. Kuvassa 5.10 a, kohteen oikeassa yläreunassa olevat yksityiskohdat ovat selvemmin näkyvissä kuin koko kohteen alareunan alueella. Epäsuora holografinen menetelmä toistaa kohteen yläreunan yksityiskohdat (kulmat, raot) miltei yhtä hyvin kuin suoraa vaiheen mittausta hyödyntävässä menetelmässä. Vaikka epäsuora holografinen kuvaus antaaakin hieman epäselvemmän kuvan, samat yksityiskohdat voidaan tunnistaa molemmista kuvista: 8 mm ja 6 mm raot ovat näkyvissä, ja 4 mm rako erottuu molemmista kuvista.



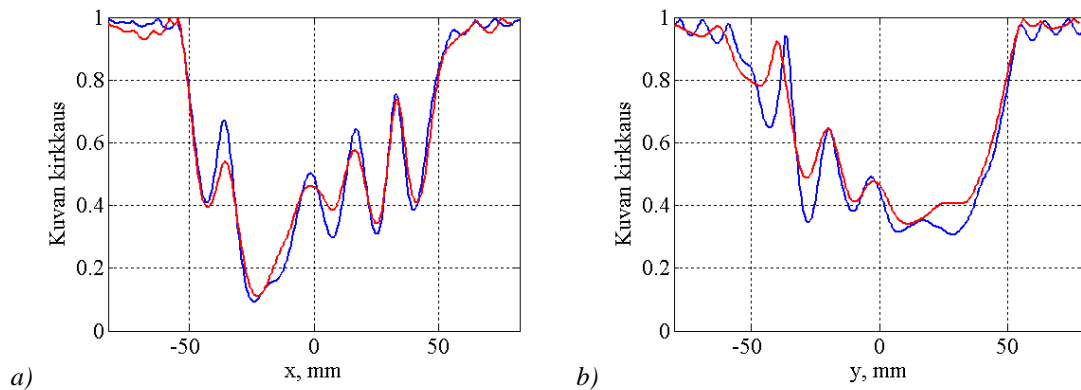
Kuva 5.10. Millimetriaaltokuva testikuvioista epäsuoralla ja suoralla holografisella menetelmällä.

Kummassakaan kuvassa ei näy 2 mm rakoja. Suurin pyöreistä rei'istä (10 mm) näkyy molemmissa kuvissa, 8 mm reikä näkyy vain epäselvästi. Millimetriaaltokuvissa näkyy voimakas piirre, joka johtuu polystyreenipylvästä (kuvassa 5.11).



Kuva 5.11. Kuvauksessa käytetty testikuvio ja sitä kannatteleva polystyreenipylväs. Punaiset viivat kuvaavat poikkileikkausten (kuva 5.12 a ja b) kohtia.

Kuvassa 5.12 a ja b on esitetty kuvien 5.10 a ja b poikkileikkaukset, jotka kulkevat vaakasuoraan kohteen suurimman pyöreän reiän keskipisteen kautta ja pystysuoraan kohteen oikeassa reunassa. Leikkausten paikat on esitetty kuvassa 5.11. Kohde on hieman eri kohdissa kuvaa kuvissa 5.10 a ja b. Tämä johtuu epäsuorasta holografisesta menetelmästä, joka voi siirtää kohteen paikkaa millimetriaaltokuvassa. Poikkileikkauksiin on jälkikäteen lisätty x - tai y -suuntainen siirto siten, että eri menetelmillä otettujen millimetriaaltokuvien vastaavat yksityiskohdat kohtaavat.



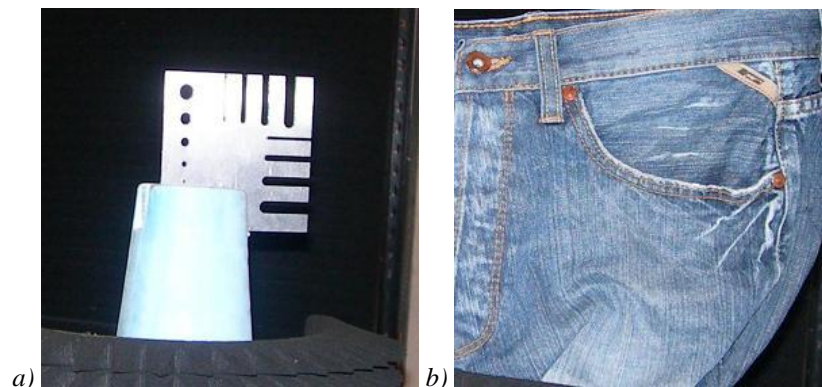
Kuva 5.12. a) vaakasuuntainen poikkileikkaus testikuvion suurimman reiän kohdan kautta, b) pystysuuntainen poikkileikkaus testikuvion oikeaa reunaa pitkin. Poikkileikkaukset on kuvattu epäsuoralla (punainen) ja suoralla (sininen) holografisella menetelmällä.

Poikkileikkaukset osoittavat kuvauksen onnistuneen paremmin vaakasuunnassa, jolloin yksityiskohtien reunat ovat pystysuuntaiset – samansuuntaiset käytetyn polarisaation kanssa. Verrattaessa epäsuoraa holografista menetelmää suoraan menetelmään, huomataan, että kohteen yksityiskohtien tuottamat amplitudivaihtelut ovat miltei samoissa kohdissa kuvaa. Ideaalisessa tapauksessa poikkileikkauksissa tulisi olla arvo 0, kun ollaan metallin kohdalla, ja arvo 1, kun ollaan aukon kohdalla. Poikkileikkaukset on normalisoitu maksimiarvoonsa, joten kohteen ulkopuolella saavutetaan kirkkauden arvo 1. Kohteen

kirkkaus ei kuitenkaan saa ideaalista maksimi- eikä minimiarvoaan kohtaa leikkauksia, vaan kohteen metallisten yksityiskohtien ja aukkojen vaikutus näkyy vain paikallisina minimeinä ja maksimeina. Leikkausten tummimmassa kohdassa, pienimmän pystysuuntaisen raon ja suurimman reiän välissä olevalla alueella kirkkaus (5.1) on noin 0,1 molemmilla menetelmillä. Kirkkain kohta saadaan suurimman raon kohdalla, jolloin kirkkaus on 0,75. Kirkkaus saa lähes arvon 0 yksittäisissä pisteissä leikkausten ulkopuolella, alueella, jonka lähetytyillä ei ole kohteen yksityiskohtia.

Kun kohteen yksityiskohtien koko pienenee, niitä kuvaavien paikallisten maksimien ja minimien ero pienenee, jolloin kuvan kirkkausvaihtelut pienenevät, ja lähestytään tilannetta, jossa yksityiskohtaa ei enää voi erottaa: tullaan kuvausmenetelmän erotuskyvyn rajalle. Kuvista 5.12 a ja b nähdään, että käytettäessä epäsuoraa holografista menetelmää, kuvan kirkkausvaihtelut pienenevät suoraan menetelmää nopeammin yksityiskohtien pienetessä. Kuvassa 5.12 a suurimman raon (8 mm) kohdalla kaksi menetelmää tuottavat käytännössä yhtä suuren kirkkauden muutoksen kuvaan, mutta toiseksi pienimmän raon (4 mm) vaikutus epäsuoralla menetelmällä on noin puolet pienempi kuin suoralla menetelmällä. Lisäksi suoralla menetelmällä otetun kuvan poikkileikkauksessa voi nähdä pienen muutoksen kirkkaudessa pienimmän pystysuoran raon (2 mm) kohdalla, vaikkei sitä koko kuvasta helposti voi erottaakaan.

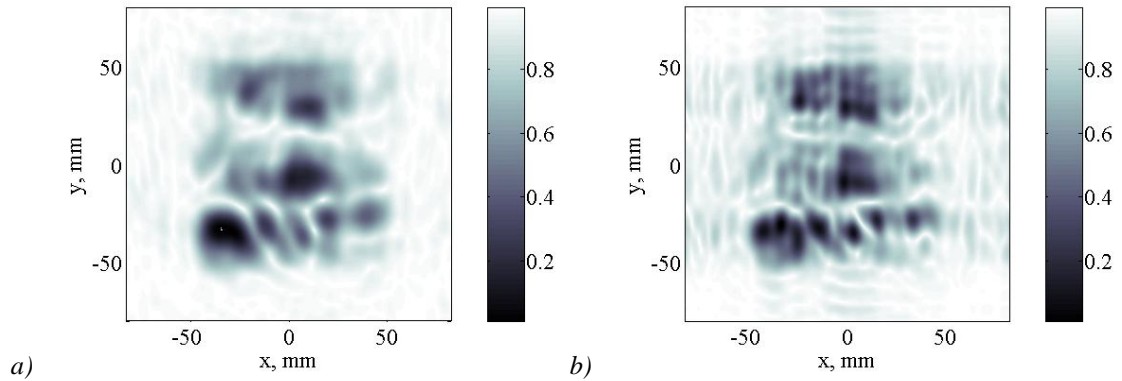
Lopuksi tutkittiin kuvausmenetelmien kykyä kuvata kohteita, jotka ovat jonkin toisen materiaalin peitossa. Tätä varten testikuvio peitettiin farmarihousuilla – simuloiden suhteellisen tiheän kankaan taakse verhottua esinettä (kuva 5.13). Testikuvio oli paikallaan samassa asennossa kuin tilanteessa, jossa kuvat 5.10 a ja b otettiin. Millimetriaaltokuvat kankaalla peitetystä testikuvioista on esitetty kuvissa 5.14 a ja b. Mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä H.



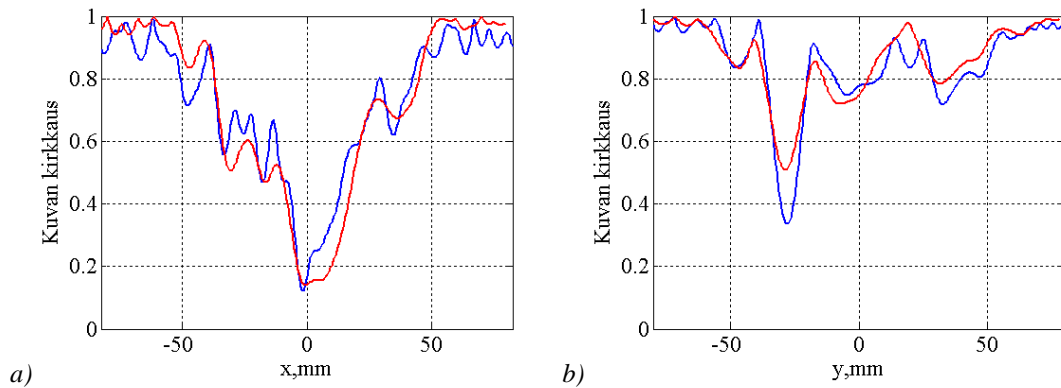
Kuva 5.13. Testikuvio a) peitettynä farmarikankaalla b).

Kankaalla peitetystä testikuvioista ei voida erottaa yksityiskohtia kummallakaan menetelmällä otetuista millimetriaaltokuvista. Epäsuoralla menetelmällä saatu kuva noudattaa kuitenkin hyvin testikuvion ulkomittoja. Suoralla menetelmällä otetussa kuvassa testikuvion pystysuuntaiset reunat ovat vaikeammin määritettävissä vaakasuunnassa olevan voimakkaan aaltoilun takia. Molemmilla menetelmillä otetuissa kuvissa nähdään

teräväpiirteisiä kirkkaita yksityiskohtia, jotka eivät kuitenkaan liity suoraan testikuvion yksityiskohtiin.



Kuva 5.14. Millimetriaaltokuva kankaalla peitetystä testikuvioista a) epäsuoralla ja b) suoralla holografisella menetelmällä.



Kuva 5.15. Kuvia 5.12 a ja b vastaavat poikkileikkaukset kankaalla peitetyn testikuvion millimetriaaltokuvasta epäsuoralla (punainen) ja suoralla (sininen) holografisella menetelmällä.

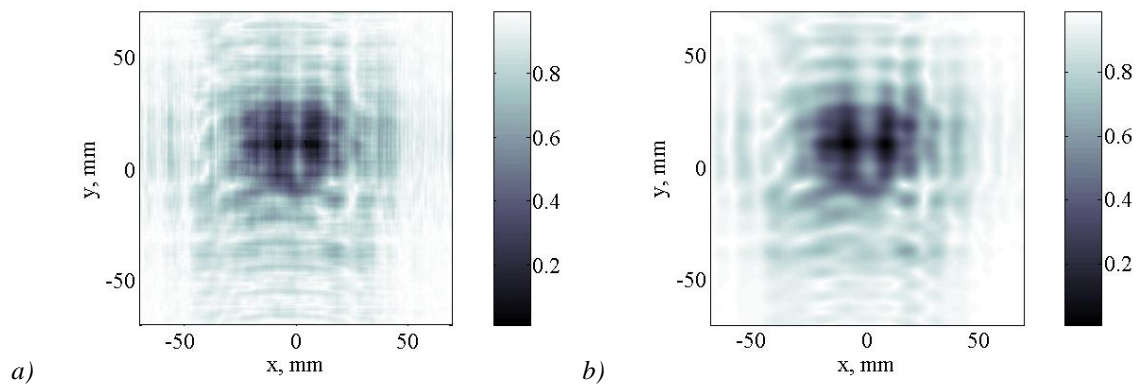
Kuvissa 5.15 a ja b esitetyt poikkileikkaukset ovat samoista kohdista kuvaa kuin poikkileikkaukset 5.12 a ja b. Poikkileikkaukset vastaavat vain vähän toisiaan, kun verrataan paljasta testikuvioita kankaalla peitettyyn. Ainoastaan y-suuntaisen poikkileikkauksen 5.15 b minimi vastaa hyvin paikallista minimiä poikkileikkauksessa 5.12 b. Vaakasuuntaisessa poikkileikkauksessa näkyy hyvin suoran menetelmän tuottama aaltoilu, joka on testikuvion ulkopuolella yli kaksinkertainen epäsuoraan menetelmään verrattuna. Pystysuunnassa aaltoilu on molemmilla menetelmillä lähes yhtä suurta.

5.2 REFERENSSIKENTTÄNÄ GAUSSIN KEILA

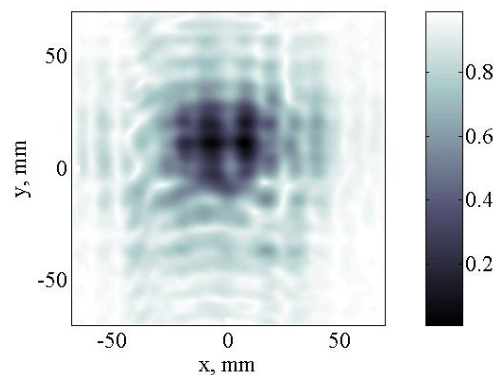
5.2.1 TESTIKUVIO

Tasoaallon käyttö referenssikenttänä epäsuorassa holografisessa kuvauksessa lisää tarvittavan laitteiston monimutkaisuutta, joten kuvausta kokeiltiin myös käyttäen referenssikenttänä korrugoidun torviantennin luomaa Gaussin keilaa.

Kuvissa 5.16 a ja b on esitetty testikuvion millimetriaaltokuva sekä epäsuoralla että suoralla menetelmällä kuvattuna, kun apertuurin kooksi valittiin $14 \times 14 \text{ cm}^2$. Mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä I. Molemmilla menetelmillä saadut kuvat ovat epäselviä, ja niiden perusteella vain testikuvion ulkomittoja voidaan arvioida. Epäsuoralla menetelmällä saadussa kuvassa on nopeaa periodista vaihtelua sekä pysty- että vaakasuunnassa. Eri menetelmillä otetut kuvat kuitenkin vastaavat toisiaan hyvin, kun nopea vaihtelu epäsuoralla menetelmällä otetussa kuvassa jätetään huomiotta.

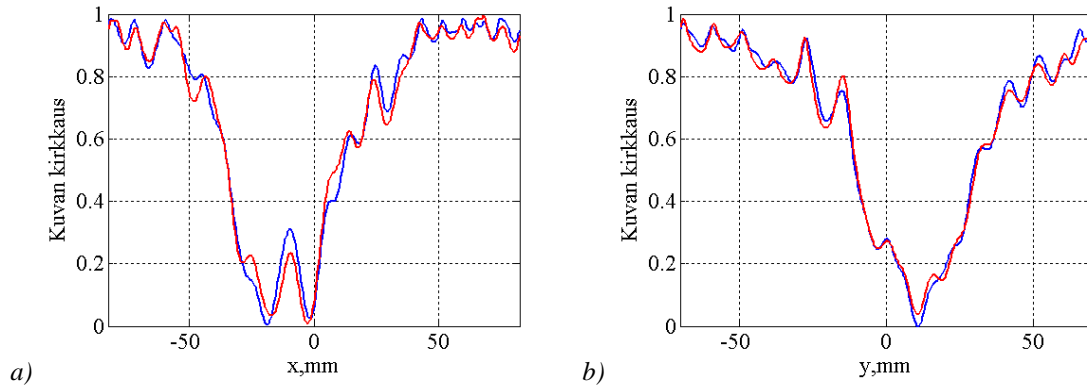


Kuva 5.16. Millimetriaaltokuva testikuvioista a) epäsuoralla ja b) suoralla holografisella menetelmällä käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä. Apertuurin koko on $14 \times 14 \text{ cm}^2$.



Kuva 5.17. Millimetriaaltokuva testikuvioista epäsuoralla holografisella menetelmällä käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä, ja kun dekonvoluutiotermin (3.52) on ikkunoitu. Apertuurin koko on $14 \times 14 \text{ cm}^2$.

Epäsuoralla menetelmällä saatu kirkkauden nopea vaihtelu johtuu dekonvoluutio-operaatiosta (3.52), jossa katkaisuvirheestä johtuvat näennäiset spektrikomponentit (k_x - ja k_y -akselin suuntaiset spektrikomponentit liitteissä A ja I) vaikuttavat pysty- ja vaakasuuntaiseen kirkkauden vaihteluun lopullisessa kuvassa. Kun rekonstruoidun kohdekentän tasoaaltospektristä suodatetaan kaikki muu pois, paitsi se osa, joka vastaa kohteen suuntaa, saadaan kuvan 5.17 mukainen millimetriaaltokuva.



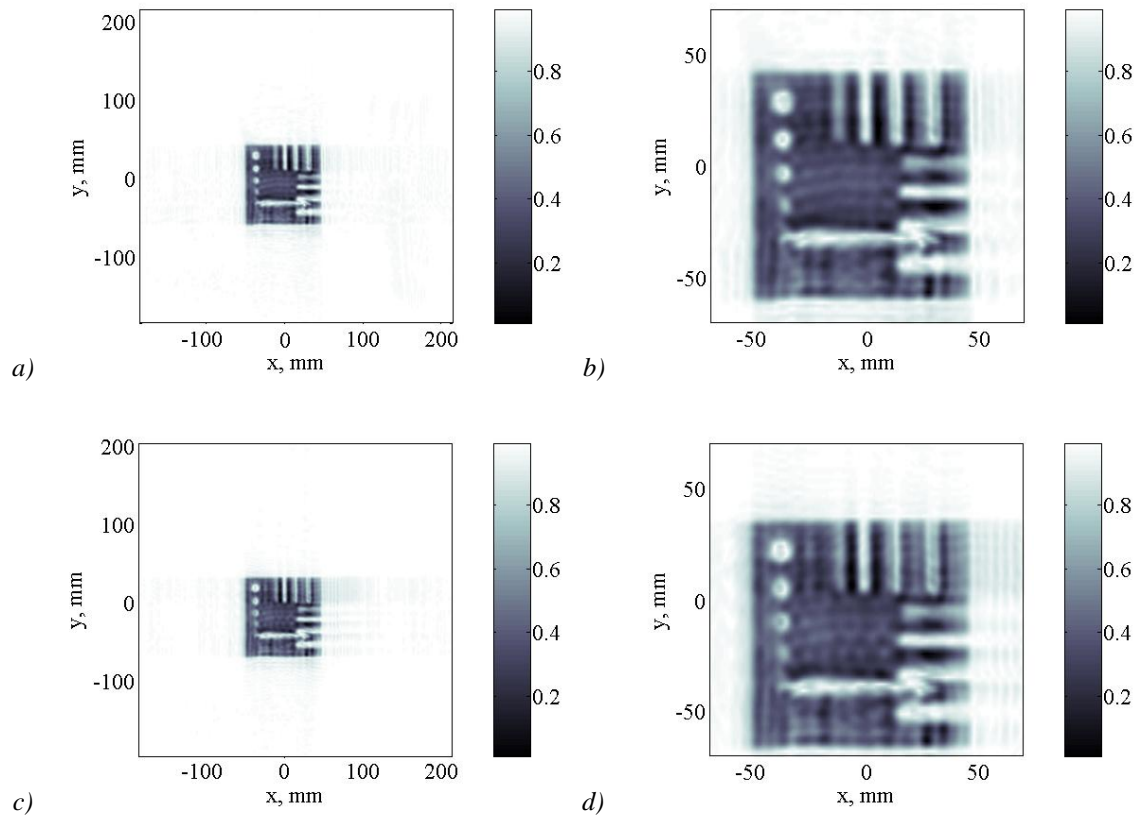
Kuva 5.18. Poikkileikkaukset testikuvion millimetriaaltokuvasta epäsuoralla (punainen) ja suoralla (sininen) holografisella menetelmällä, kun referenssikenttänä käytetään Gaussin keilaa.

Suodatuksen jälkeen molemmilla menetelmillä saadut kuvat ovat käytännössä samanlaiset. Poikkileikkaukset kuvan keskeltä pysty- ja vaakasuunnissa kuvissa 5.18 a ja b osoittavat menetelmien antamien kuvien vastaavan toisiaan hyvin. Ts. vaikka menetelmien antamat kuvat ovat laadultaan huomattavasti huonompia kuin tasoaaltoreferenssiä käytettäessä, epäsuoran menetelmän dekonvoluutio (3.52) näyttää kuitenkin toimivan varsin hyvin kohdekentän palautuksessa.

Liitteessä I esitetty interferenssikuvio osoittaa, että kohdekenttä ulottuu suuremmalle alueelle, kuin käytetty $14 \times 14 \text{ cm}^2$ apertuuri. Testikuvion kuvausta kokeiltiin suuremmalla, $40 \times 40 \text{ cm}^2$ apertuurilla, jotta apertuurille saataisiin enemmän kohdekentän tehoa – enemmän tietoa kohdekentästä. Mikäli käytettäisiin samaa näyteväliä kuin aiemmin (0,50 mm), suurempi apertuuri vaatisi noin 642000 näytepistettä, joiden mittaamiseen kuluva aika olisi useita vuorokausia. Näyteväliä voitiin kuitenkin suurentaa referenssikentän tulokulmaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Nyt y-suuntaiseksi kentän näytteistysväliksi valittiin 1,5 mm, jolloin näkökenttä kapeni $\pm 19^\circ$:een, mutta joka riittää hyvin 10 cm:n levyiselle kohteelle 1,5 m päässä apertuurista. Suurempi näyteväli y-suunnassa pienentää näytepisteiden määrän 215000:een.

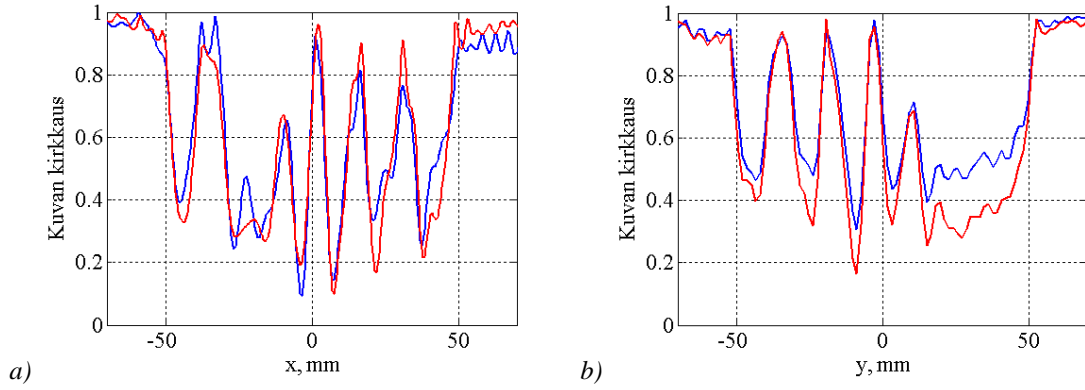
Epäsuoralla ja suoralla holografisella menetelmällä otetut millimetriaaltokuvat on esitetty kuvissa 5.19 a–d. Mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri on esitetty liitteessä J. Suoralla holografisella menetelmällä otetussa kuvassa aaltoilua x -akselin suunnassa on hieman enemmän kuin epäsuoralla menetelmällä otetussa millimetriaaltokuvassa. Suoran menetelmän antama kuvanlaatu on hieman huonompi kuin epäsuoralla menetelmällä saatu kuva. Molemmilla menetelmillä otetuissa kuvissa näkyy

vaakasuuntainen kirkas alue, joka johtuu polystyreenipylvään päädyn aiheuttamasta häiriöstä kenttään.



Kuva 5.19. Millimetriaaltokuva testikuvioista a ja b) epäsuoralla ja c ja d) suoralla holografisella menetelmällä käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä. Apertuurin koko on $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Kuvat oikealla ovat suurennoksia vasemmanpuoleisista kuvista.

Kuvien 5.19 b ja d poikkileikkaukset kuvassa 5.20 a ja b osoittavat epäsuoran menetelmän lievästi paremman kuvanlaadun. Poikkileikkauksien kohdat on merkitty kuvaan 5.11. Epäsuoralla menetelmällä testikuvion yksityiskohdat näkyvät yleensä hieman voimakkaampina verrattuna yksityiskohtien vaikutukseen suoralla menetelmällä saatuun kuvaan. Toisin kuin käytettäessä tasoaaltoreferenssiä, kirkkauden vaihtelu poikkileikkauksissa ei pienene yksityiskohtien pienentyessä, vaan vaihtelun amplitudi kasvaa 4 mm:n rakoon asti, ja vasta 2 mm raon aiheuttama amplitudivaihtelu on pienempi kuin muiden yksityiskohtien vaikutus. Liitteessä J esitetty interferenssikuvio on nyt kokonaan apertuurin alueella (vrt. interferenssikuvioon pienemmällä apertuurilla liitteessä I), ja kuva toistaa testikuvion yksityiskohdat hyvin.

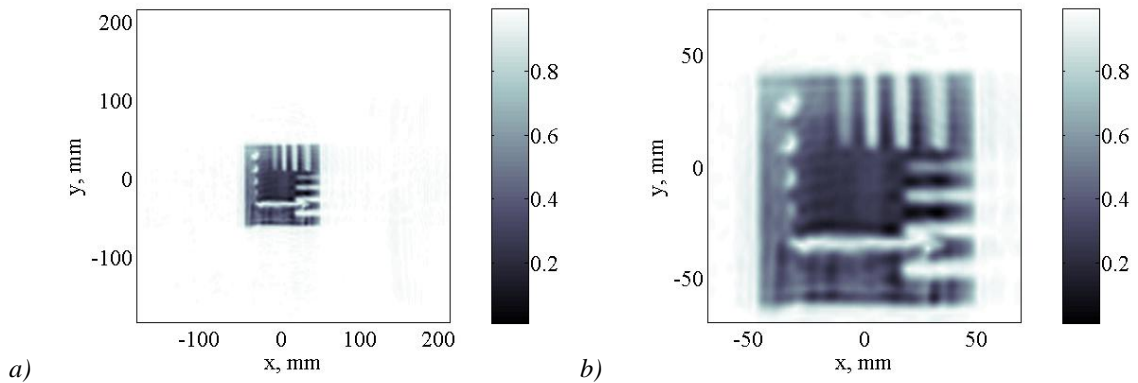


Kuva 5.20. Poikkileikkaukset testikuvion millimetriaaltokuvasta epäsuoralla (punainen) ja suoralla (sininen) holografisella menetelmällä, kun referenssikenttänä käytetään Gaussin keilaa ja apertuurin koko on $40 \times 40 \text{ cm}^2$.

Kuvan 5.19 a rekonstruomisessa käytettiin hyväksi mitattua kompleksista referenssikenttää dekonvoluutiota (3.52) laskettaessa. Epäsuorassa holografisessa kuvauksessa ei kuitenkaan ole mahdollista mitata referenssikentän vaihetta suoraan. Koska käytetyn referenssiantennin suunta ja etäisyys apertuurista tiedetään, voidaan mitattu referenssikenttä korvata simuloitulla (liite A, kuva A.1 c) laskettaessa dekonvoluutiota. Simuloinnissa laskettiin palloaallon kenttä,

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = A_r(\mathbf{r})e^{-j\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} = \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}|}e^{-jkr\cos\theta_x}, \quad (5.3)$$

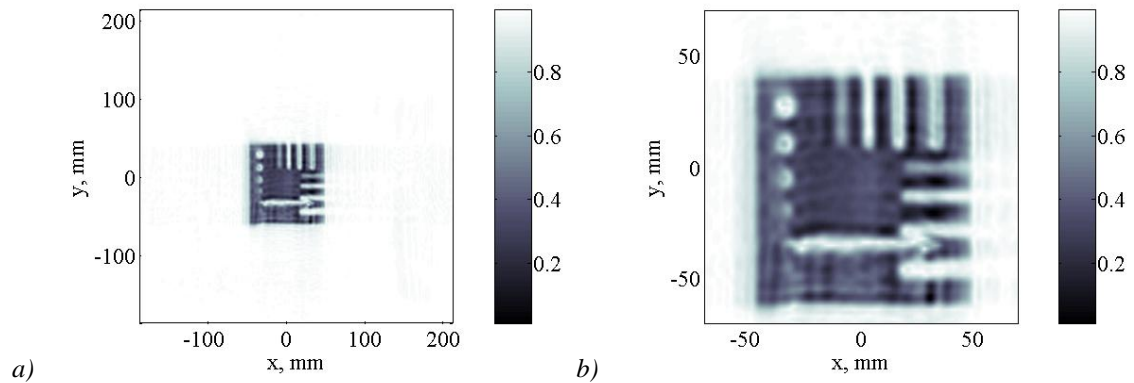
apertuurilla, kun palloaallon pistemäisen lähteen etäisyys apertuurin keskipisteeseen oli $|\mathbf{r}| = 0,90 \text{ m}$, sekä apertuurin normaalin ja lähteen suunnan välinen kulma oli $\theta_x = 42^\circ$. Simuloidun referenssikentän avulla saatu millimetriaaltokuva on esitetty kuvassa 5.21 a ja b.



Kuva 5.21. Millimetriaaltokuva testikuvioista epäsuoralla holografisella menetelmällä, kun dekonvoluutiassa (3.52) käytettiin simuloitua palloaaltokenttää (5.3). Apertuurin koko on $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Kuva oikealla b) on suurennos vasemmanpuoleisesta kuvasta a).

Simuloidulla referenssikentällä saatu millimetriaaltokuva yltää lähes yhtä hyvälle tasolle, kuin kuva, johon käytettiin mitattua referenssikenttää. Kuvassa 5.21 testikuvion reunat ovat hieman epäselvemmät kuin käytettäessä mitattua referenssikenttää kuvanmuodostuksessa. Reunojen lisäksi testikuvion vasen laita, erityisesti reikien alue, toistuu kuvassa huonoiten.

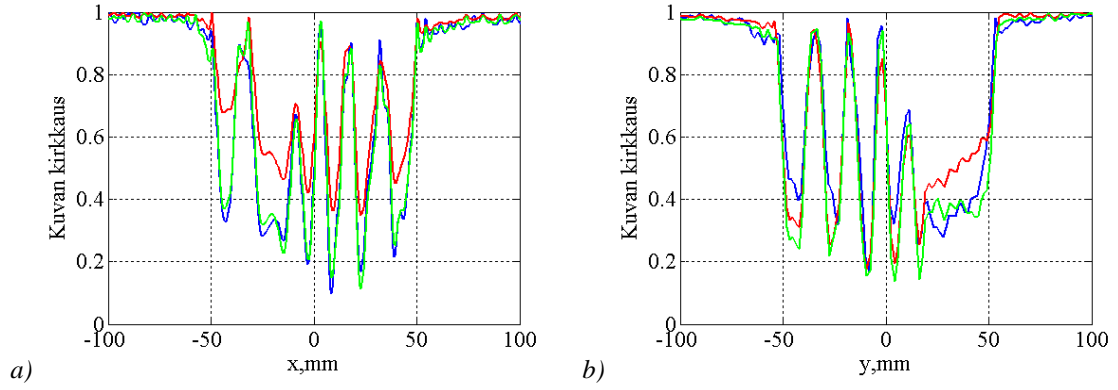
Kuvanmuodostusta voidaan edelleen parantaa käyttämällä simuloidun, palloaallon vaihetta kuvaavan referenssikentän (5.3) amplitudina apertuurilla mitattua amplitudia $A_r(\mathbf{r})$, joka saadaan yksinkertaisella mittauksella ilman kuvattavaa kohdetta. Millimetriaaltokuva testikuvioista käyttäen mitattua amplitudia ja simuloitua vaihetta on esitetty kuvissa 5.22 a ja b.



Kuva 5.22. Millimetriaaltokuva testikuvioista epäsuoralla holografisella menetelmällä, kun dekonvoluutiossa (3.52) käytettiin simuloitua palloaaltokentän vaihetta (5.3) ja mitattua amplitudia $A(\mathbf{r})$. Apertuurin koko on $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Kuva oikealla on suurennos vasemmanpuoleisesta kuvasta.

Mitatun amplitudin käyttäminen parantaa millimetriaaltokuvan laatua, ja pienet yksityiskohdat toistuvat kuvassa paikoin paremmin kuin edellisissä kuvissa; vaakasuorat raot näkyvät terävimpinä kuvassa 5.22 b.

Lopuksi esitetään poikkileikkaukset kaikilla kolmella referenssikentän palautusmenetelmällä. Poikkileikkaukset kuvassa 5.23 a ja b kulkevat kuten kuvassa 5.11 on esitetty. Poikkileikkaukset osoittavat kahden millimetriaaltokuvan olevan lähes samanlaiset käytettäessä mitattua referenssikenttää tai referenssikenttää, joka on muodostettu mitatusta amplitudista ja simuloidusta vaiheesta. Kun referenssikenttää approksimoidaan kokonaan simuloidulla palloaallolla, huomataan, että kirkkauden vaihtelut voivat osin olla pienempiä kuin edellä mainituissa tapauksissa.



Kuva 5.23. Poikkileikkaukset testikuvion millimetriaaltokuvasta, kun käytetään mitattua (sininen), simuloitua ja mitattua (vihreä) tai simuloitua (punainen) referenssikenttää dekonvoluutiassa (3.52). Apertuurin koko on $40 \times 40 \text{ cm}^2$.

5.2.2 SIGNAALI-KOHINA SUHDE MILLIMETRIAALTOKUVISSA

Kuvassa oleva kohinataso, keskihajonta, voidaan mitata kuvan osasta, jossa kirkkaus on tasainen [18]. Kuvassa 5.22 a kohinataso voidaan siis määrittää vaikkapa kuvan alareunan alueelta, jossa $y = -200 \text{ mm} \dots -150 \text{ mm}$. Kohinan avulla saadaan määritettyä myös amplitudimittauksen signaali-kohina -suhde. SNR riippuu aina mittaustilanteesta, ja se on eri kohteilla erisuuruinen.

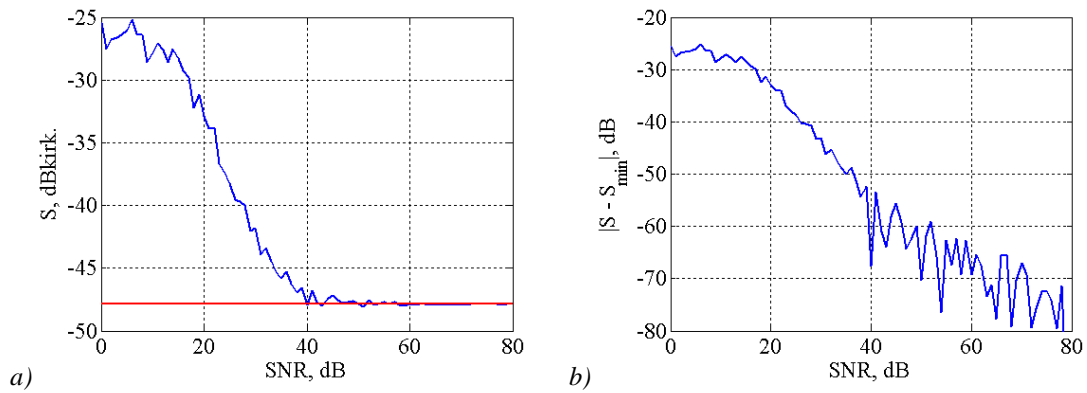
Mitatun amplitudin SNR:n määrittämiseksi mitattuun amplitudiin lisätään normaalijakautunutta kohinaa. Mitatussa amplitudissa on tietyn suuruinen kohinataso N_m , johon lisätään simuloitu kohinataso N_s , jolloin saadaan amplitudin kokonaiskohinatasoksi N_{kok} , jolle

$$N_{kok} \approx N_m, \quad \text{kun } N_s < N_m, \quad (5.4)$$

jossa kokonaiskohinataso approksimoidaan säilyvän mitatun amplitudin kohinatasolla kun simuloitu kohinataso on mitattua pienempi. Simuloidun kohinataso ylittäessä mitatun kohinataso, saadaan

$$N_{kok} \approx N_m + N_s, \quad \text{kun } N_s > N_m. \quad (5.5)$$

Nyt mitatun amplitudin SNR saadaan keinotekoisesti lisäämällä kohinan N_s määrää. Kun SNR on pienempi tai yhtä suuri kuin todellisen SNR:n taso, kokonaiskohinataso vaihtuu yhtälön (5.4) mukaisesta yhtälön (5.5) osoittamalle tasolle, ja kohinataso alkaa kasvaa. Todellinen SNR saadaan kohdasta, jossa muutos tapahtuu. Kuvassa 5.24 a on esitetty kokonaiskohinataso SNR:n funktiona. Kuvan perusteella amplitudi mittauksen SNR:n arvoksi saadaan noin 60 dB, jolloin keskihajontojen erotus on noin -67 dB (kuva 5.24 b).



Kuva 5.24. a) Millimetriaaltokuvan tasaisen, kirkkaan alueen kirkkauden varianssi eri SNR:n arvoilla (sininen) verrattuna alkuperäisen kuvan 5.22 a kirkkauden varianssiin (punainen). b) a)-kuvan suureiden erotuksen itseisarvo.

Kuvissa 5.25 a–f on esitetty millimetriaaltokuva 5.22 a eri SNR:n arvoilla. Kuvassa 5.25 a SNR = 60 dB, jolloin kuvan laadussa ei huomata eroa kuvassa 5.22 a esitettyyn. Kuvat 5.25 b–h esittävät samaa millimetriaaltokuvaa, kun SNR pienenee 24 dB:stä 16 dB:iin 2 dB:n välein.

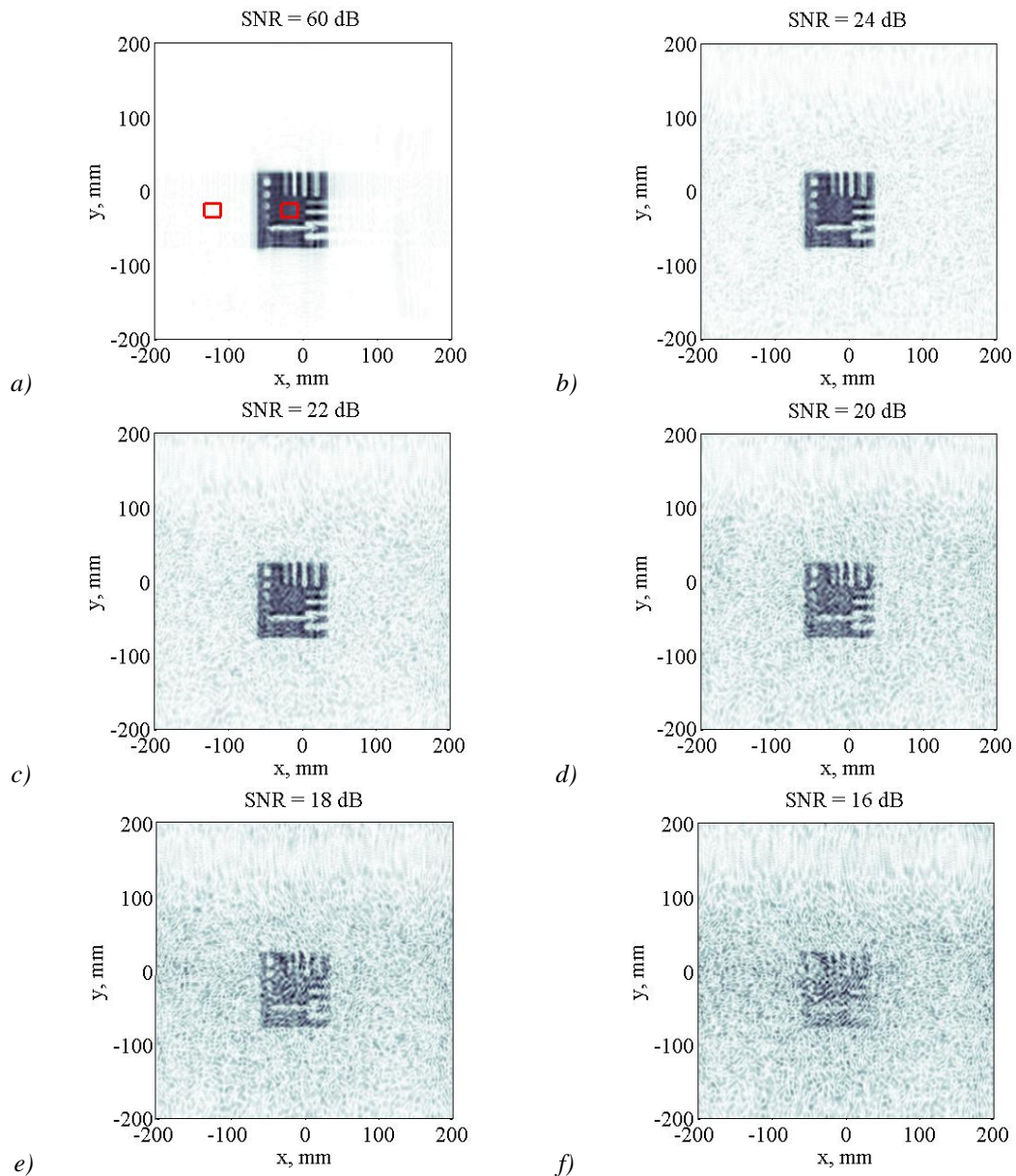
SNR:n arvolla 24 dB millimetriaaltokuvasta voidaan erottaa samat yksityiskohdat kuin kuvassa 5.22 b. Pienentynyt SNR näkyy erityisesti millimetriaaltokuvan taustan kohinan lisääntymisenä, ja pienimpien yksityiskohtien, 4 mm reiän ja 2 mm rakojen, lievänä sumenemisena.

Kun SNR on 22 dB, kuvan taustan kohina on lisääntynyt ja kuvassa olevan testikuvion ulkoreunat eivät enää näytä suorilta, vaan kohina muokkaa reunaviivaa satunnaiseksi. Kuvassa näkyvät reiät eivät enää ole pyöreitä, vaikka samat yksityiskohdat kuin kuvassa 5.22 a voidaan vielä sanoa näkyvän.

SNR:n pienentyessä 20 dB:iin, lisääntynyt kohina muokkaa testikuvion ulkoreunoja yhä enemmän, jolloin niiden poikkeama suorasta on jo testikuvion pienimpien yksityiskohtien luokkaa. Ilman aiempaa tietoa testikuviosta, siinä olevia 4 mm reikää ja 2 mm:n rakoja ei voida enää tunnistaa millimetriaaltokuvasta.

Kun SNR = 18 dB, testikuvion rei'istä voidaan erottaa vain kaksi suurinta (8 mm ja 10 mm). Vain 8 mm:n ja 6 mm:n levyiset raot on erotettavissa. Polystyreenipylvään aiheuttama häiriö näkyy millimetriaaltokuvissa yhä.

Kuvasta voidaan erottaa enää testikuvion neliön muoto ja ulkomitat, kun SNR on 16 dB.

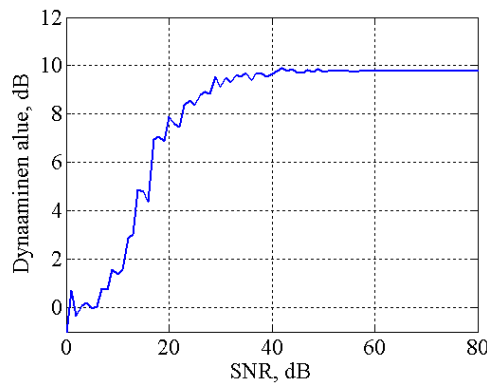


Kuva 5.25. Millimetriaaltokuva 5.22 a eri mitatun amplitudin SNR:n arvoilla. Neliöt kuvassa a) rajaavat ne alueet, jolta kirkkauden keskihajonnat määritellään dynaamista aluetta (5.6) varten.

Visuaalisen kuvien laadun tarkastelun lisäksi kohinan lisäyksen vaikutusta saatuun millimetriaaltokuvaan voidaan arvioida laskemalla kuvan dynaaminen alue SNR:n funktiona. Käytettäessä tasoaltoreferenssiä, millimetriaaltokuvien kirkkauden dynaaminen alue (kuvat 5.3 a–d) laskettiin kahdesta eri kuvasta (kuvat 5.2 a, b ja e, f). Toisessa kuvassa ei ollut kohdetta lainkaan, ja toisessa käytettiin hyvin heijastavaa metallilevyä. Nyt dynaaminen alue määritellään käyttäen yhdestä kohteesta otettua millimetriaaltokuvaa 5.22 a. Dynaaminen alue DY saadaan kirkkauden suhteesta millimetriaalto-kuvan tumman ja vaalean alueen välillä:

$$DY = \frac{\overline{B_{kirkas}}}{\overline{B_{tumma}}}, \quad (5.6)$$

jossa $\overline{B_{kirkas}}$ ja $\overline{B_{tumma}}$ ovat kirkkaan ja tumman alueen kirkkauden keskiarvot. Tumma-alueeksi valittiin kuvassa näkyvän testikuvion keskikohta, jossa ei ole testikuvion yksityiskohtia. Vaaleaksi alueeksi valittiin testikuvion vieressä oleva kohta taustasta. Dynaamisen alueen määrittämiseen käytetyt alueet millimetriaaltokuvassa on korostettu punaisiin neliöin kuvassa 5.25 a. Dynaaminen alue eri SNR:n arvoilla on esitetty kuvassa 5.26. Huomataan, että kuvan kirkkauden dynaaminen alue nousee 0 dB:stä 9,8 dB:iin kun SNR kasvaa 5 dB:stä noin 40 dB:iin. Kuvan kirkkauden dynaaminen alue ei enää muutu SNR:n kasvaessa edelleen. Dynaaminen alue rajoittuu käytetyn laitteiston dynaamiseen alueeseen, jolloin lisätyllä kohinalla ei enää ole vaikutusta, ja dynaaminen alue jää 9,8 dB:n vakiotasolle kuvassa 5.26.



Kuva 5.26. Millimetriaaltokuvien 5.25 a–f kirkkauden dynaaminen alue SNR:n funktiona.

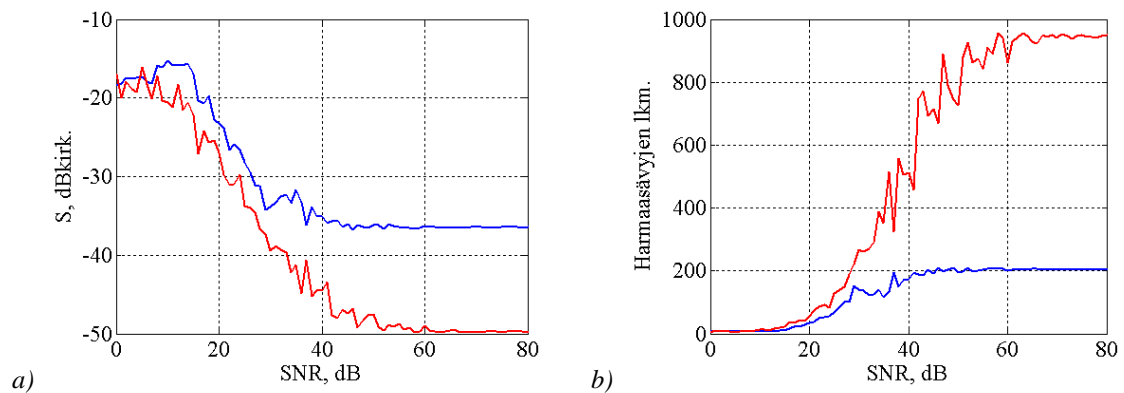
Dynaamisen alueen ja kirkkauden keskihajonnan avulla voidaan määrittää kuvassa olevien harmaasävyjen lukumäärä. Mikäli kuvattavana on yksityiskohta, joka aiheuttaa juuri ja juuri suuremman kirkkauden muutoksen kuin tasaisessa taustassa nähtävä laitteiston kohinasta johtuva kirkkauden vaihtelu (keskihajonta), ajatellaan, että tämä yksityiskohta havaitaan ja voidaan nähdä pienimpänä mahdollisena muutoksena kuvan harmaasävyssä (kahden vierekkäisen harmaasävyjen ero). Arvio suurimmasta mahdollisesta lukumäärästä harmaasävyjä voidaan siten määrittää jakamalla dynaaminen alue kirkkauden keskihajonnalla:

$$G_{hs} = \frac{D}{S}, \quad (5.7)$$

jossa S on kirkkauden keskihajonta millimetriaaltokuvan kirkkaassa tai tummassa alueessa. Kuvassa 5.27 a ja b on esitetty keskihajonnat ja harmaasävyjen lukumäärät, kun keskihajonta määritettiin kuvassa 5.25 a merkityiltä kirkkaalta ja tummalta alueelta. Huomataan (kuva 5.27 a), että tummalta alueelta (testikuvion keskeltä) mitattu keskihajonta on suurempi kuin keskihajonta, joka on mitattu millimetriaaltokuvan taustasta. Nyt myös

harmaasävyjen lukumäärä (kuva 5.27 b) riippuu alueesta, jolta keskihajonta on määritetty. Kun SNR on pienempi kuin 30 dB, harmaasävyjen lukumäärä muuttuu likimäärin samalla tavalla riippumatta käytetystä keskihajonnasta. SNR:n kasvaessa harmaasävyjen lukumäärä saturoituu 200:aan SNR:n kasvaessa noin 50 dB:iin, kun keskihajonta saadaan millimetriaaltokuvan tummalta alueelta. Kirkkaasta taustasta määritetty keskihajonta antaa harmaasävyjen lukumääräksi noin 950, mutta harmaasävyjen lukumäärä vakiintuu vasta noin 75 dB:n SNR:lla.

Ero eri keskihajontojen avulla saaduissa harmaasävyjen lukumäärissä johtuu kuvausmenetelmän epäideaalisuuksista; keskihajonta testikuvion keskikohdasta tulisi olla yhtä pieni kuin muuallakin kuvassa, jossa ei ole yksityiskohtia. Syy eroon voi olla esimerkiksi testikuvion reunojen aiheuttama aaltoilu, joka lisää tummalla alueella mitattua keskihajontaa.



Kuva 5.27. Millimetriaaltokuvien 5.25 a–f a) kirkkauden keskihajonta vaalealla (punainen) ja tummalla (sininen) alueella kuvassa. b) harmaasävyjen lukumäärä, kun käytetään tumman (sininen) ja vaalean (punainen) alueen keskihajontaa.

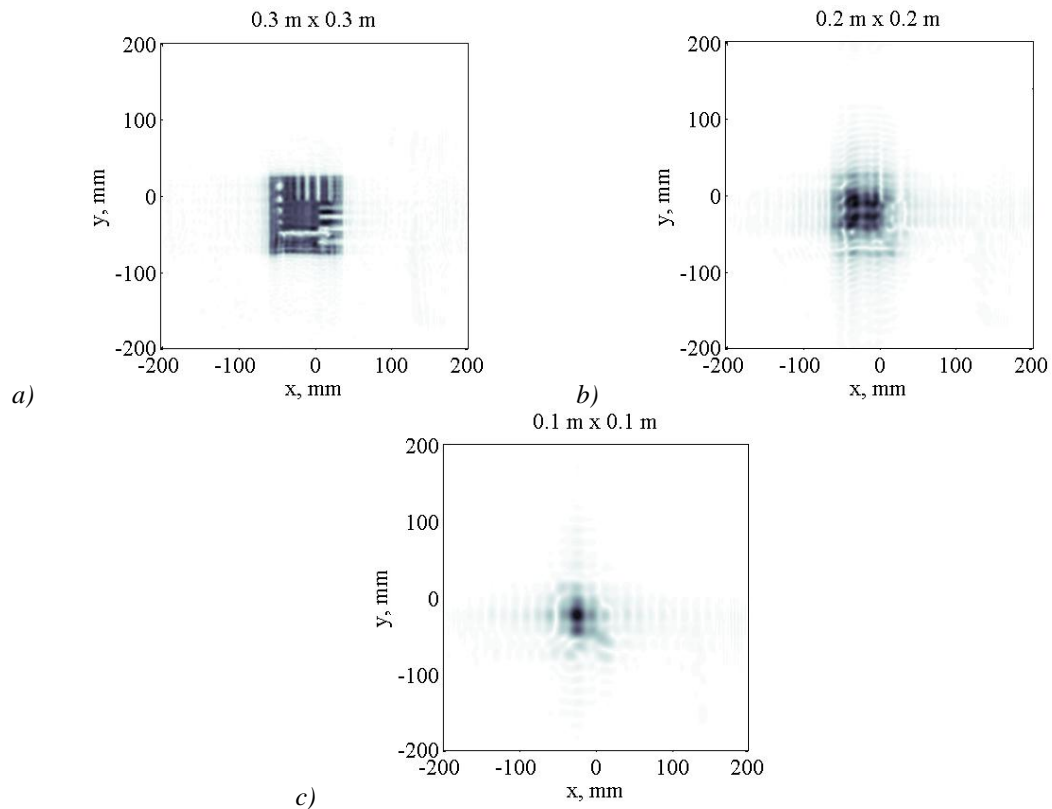
5.2.3 APERTUURIN KOON VAIKUTUS

Kuvissa 5.19–5.22 esitetyt millimetriaaltokuvat on saatu virtuaalisella vastaanotinryhmällä, joka käsittää noin 215 tuhatta vastaanotinta. Vaadittavan suuren vastaanotinmäärän vähentämiseksi apertuurin kokoa voidaan pienentää – väistämättä pienentäen saavutettavaa erotuskykyä (yhtälö (3.60)). Mikäli kuvattava kohde ei sirota valaisukenttää tehokkaasti eri suuntiin, kuten käytetty testikuvio, pieni virhe kohteen suuntaamisessa voi ratkaisevasti vaikuttaa apertuurille saatavaan kohteelta sironneeseen tehoon. Isommalla apertuurilla yksinkertaisesti kasvatetaan mahdollisuutta kattaa kohdekentän ja referenssikentän interferenssikuvio. Kuvissa 5.28 a–c on esitetty millimetriaaltokuvat kuvaa 5.22 a vastaavassa tilanteessa, kun apertuurin kokoa muutetaan.

Kuvassa 5.28 a apertuurin koko on 0,3 m x 0,3 m, jolloin teoreettinen erotuskyky 1,5 m:n etäisyydellä on noin 2 mm. Kuvasta havaitaan, että kuvaus olisi voitu suorittaa myös tällä apertuurin koolla; kuvan laatu ei merkittävästi poikkea 0,4 m x 0,4 m apertuurilla saadusta millimetriaaltokuvasta 5.22 a.

Apertuurin pienentyessä $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$:iin, teoriassa saavutettava erotuskyky on noin 4 mm . Kuvassa onkin viitteitä siitä, että 4 mm :n pystysuora rako ja osa rei'istä olisi näkyvissä. Nyt kuitenkin kuvan kirkkaus on voimakkaasti vääristynyt siten, että vain testikuvion keskikohdassa oleva kirkkaus vastaa edellä saatuja millimetriaaltokuvia. Myös aaltoilu kuvion reunoilta lähtien on lisääntynyt, kuvaten interferenssikuvion katkeamista apertuurin reunalla.

Vaikka $0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$:n apertuurilla tulisi saada noin 7 mm :n erotuskyky kohteen etäisyydellä, ei saatu millimetriaaltokuva sisällä mitään piirteitä testikuvioista, ja kuvasta voidaan päätellä vain kohteen olemassaolo.



Kuva 5.28. Millimetriaaltokuvaa 5.22 a vastaavat kuvat, kun apertuurin kokoa muutetaan.

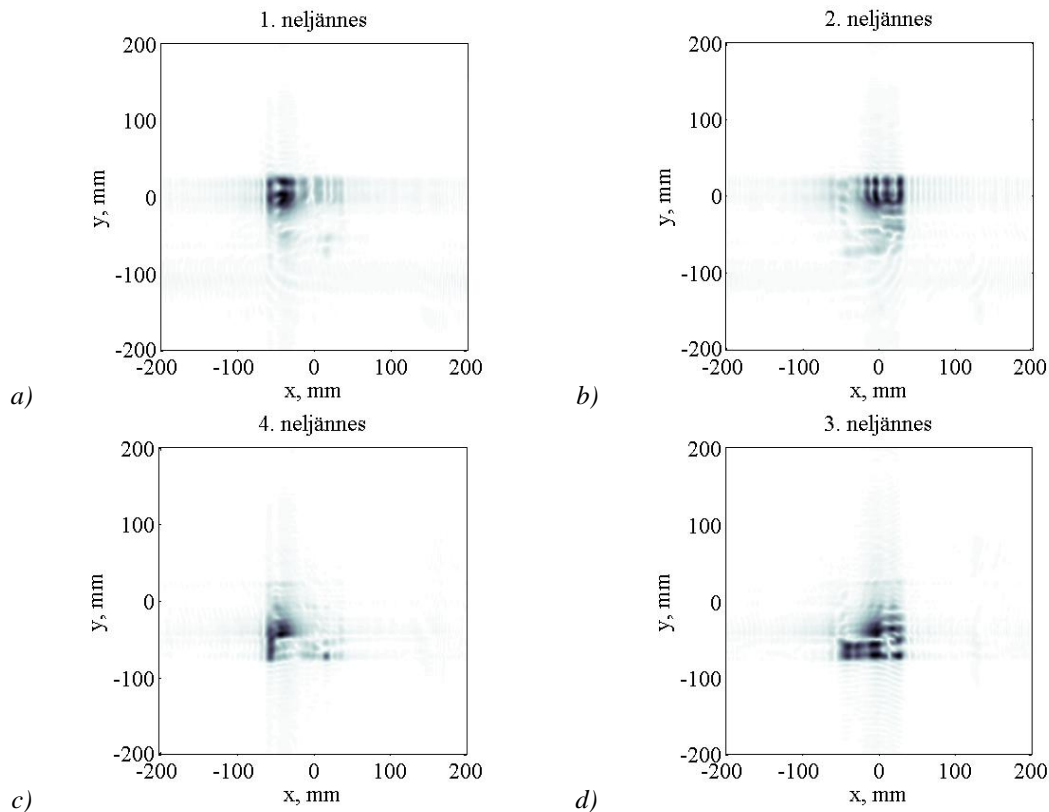
5.2.4 APERTUURIN PAIKAN VAIKUTUS

Hologrammin (interferenssikuvio kuvauslaitteen apertuurilla) voidaan sanoa olevan redundanttinen tai ei-redundanttinen [36], jolla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon kohteen eri osista heijastunut kenttä vaikuttaa interferenssikuvioon koko apertuurin alueella. Täysin redundanttisen hologrammin tapauksessa jokainen kohteen sirottava piste vaikuttaa kaikkiin interferenssikuvion pisteisiin, ja kohdekentän voidaan ajatella koostuvan lukuisista erisuuntaisista tasoaaltokomponenteista. Ei-redundantisessa hologrammissa tietyistä kohteella olevasta sirottavasta pisteestä saadaan vaikutusta vain osaan interferenssikuvioista, ja kohdekenttä koostuu siten suurimmaksi osaksi yhdensuuntaisista tai lähes yhdensuuntaisista tasoaaltokomponenteista.

Jos redundanttinen hologrammi jaetaan pienempiin osiin, kuva kohteesta säilyy edelleen, vaikka erotuskyky pienenee yhtälön (3.60) mukaisesti. Jaettaessa ei-redundanttinen hologrammi osiin, erotuskyvyn pienenemisen lisäksi kuvassa näkyy vain se osa kohteesta, joka vastaa aluetta, jolta hologrammin osa on valittu.

Hologrammin redundanttisuus on tärkeää, kun halutaan saada aidosti kolmiulotteinen kuva kohteesta. Ei-redundanttisissa hologrammeissa kohdekentän yhdensuuntaiset tasoaaltokomponentit eivät sisällä tietoa eri syvyyksiltä kohdetta tulleista heijastuksista, kun taas redundanttisella hologrammilla kohdekentän erisuuntaiset tasoaaltokomponentit antavat kohteen muodosta enemmän tietoa. Lisäksi käytännön etuna redundanttisella hologrammilla on sen nimensä mukainen kyky sietää hologrammeissa olevia häiriöitä; kuvan laatu ei ratkaisevasti heikkene, vaikka osa interferenssikuvion mittaamiseen käytetyistä vastaanottimista ei toimisi.

Kohdekentän jakautumista koko apertuurin alalle voidaan arvioida jakamalla kuvaa 5.22 a millimetriaaltokuvaa vastaava hologrammi (0,4 m x 0,4 m:n interferenssikuvio) neljänneksiin. Saadaan neljä 0,2 m x 0,2 m:n apertuuria, joilla saadaan teoriassa 4 mm:n erotuskyky. Millimetriaaltokuvat eri apertuureilla testikuvioista on esitetty kuvissa 5.29 a–d.



Kuva 5.29. Eri apertuurin neljänneksillä saadut millimetriaaltokuvat.

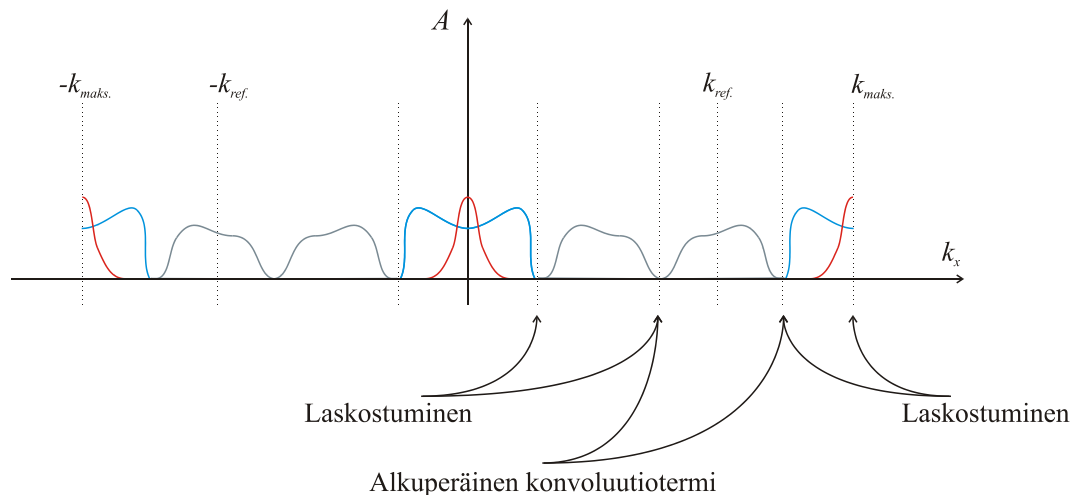
Eri neljännes-apertuureilla otetuissa millimetriaaltokuvissa saadaan yksityiskohtia näkyviin parhaiten siltä alueelta, joka vastaa kyseistä apertuurin neljänneestä – osoittaen saadun hologrammin ei-redundanttisen luonteen. Toisaalta, kaikissa millimetriaaltokuvissa näkyy

myös yksityiskohtia apertuurin ulkopuolelta. Lisäksi huomataan, että millimetriaaltokuvassa hologrammin redundanttisuuden takia näkyvässä osassa on yhtä hyvä erotuskyky, kuin ei-redundanttisuutta vastaavassa osassa (2. neljännestä vastaavassa kuvassa 5.29 b nähdään reiät aina 4 mm:n kokoon asti).

Hologrammin redundanttisuus riippuu paljolti kuvattavasta kohteesta ja valaisukentästä; jos tasomaista, apertuuria pienempää kohdetta valaistaan tasoaaltokentällä, saadaan voimakkaasti ei-redundanttinen hologrammi. Kohde toimii tasopeilin tavoin ja ohjaa valaisukentän pienelle alueelle hologrammia. Jos kohde muodoltaan satunnainen, tasomainen valaisukenttä siroaa siitä eri suuntiin, ja saadaan redundanttinen hologrammi.

5.2.5 KUVAAUS ALINÄYTTETETYLLÄ HOLOGRAMMILLA

Holografinen kuvaus tarjoaa erikoistapauksen, jonka avulla apertuurilla tarvittavien vastaanotinten määrää voidaan huomattavasti vähentää ilman, että millimetriaaltokuvan laatu kärsii. Luvussa 3 määriteltiin vaadittava Nyqvistin ehdon mukainen interferenssikuvion näytteistysväli (3.55) apertuurilla. Mikäli näytteistysväli on suurempi kuin vaaditaan, spektri (3.50) laskostuu, jolloin spektriin ilmestyy näennäisiä komponentteja. Mikäli laskostuminen tapahtuu sille spektrin (3.50) alueelle, jota ei käytetä kohdekentän vaiheen palauttamisessa (neliöity alue kuvassa 4.12 b tai 4.13 b), alinäytteistyksellä ei ole vaikutusta saatuun millimetriaaltokuvaan. Hahmotelma spektristä (3.50) on esitetty kuvassa 5.30, kun käytetään alinäytteistämistä.



Kuva 5.30 Alinäytteistetty spektri (3.50), kun autokorrelaatio- ja konvoluutiotermi ovat erottuneet juuri riittävästi.

Kun interferenssikuvioita näytteistetään, FFT -muunnoksessa mitattu signaali ja sen spektri oletetaan jaksolliseksi, jolloin spektri toistuu näytteenottotaajuuden välein. Kun näytteenottotaajuus on k_s , mitattavan signaalin spektri saadaan kohtiin

$$n \times k_s \pm k_{maks}. \quad (5.8)$$

Oleellista on, että spektri (3.50) ei ole jatkuva. Spektri on jakautunut referenssikentän tulotason suunnassa kolmeen erilliseen termiin, joiden välissä spektri on kohinatasolla. Kun näytteistystaajuus valitaan siten, että

$$\max(2B_r^x, 2B_k) + B_k + B_r^x + k_{ref.} < k_s^x < 2k_{ref.} - 2(B_k + B_r^x), \quad (5.9)$$

jolloin oletetaan, että

$$\max(2B_r^x, 2B_k) + 2(B_k + B_r^x) < k_{ref.} < k_{maks.} - \max(2B_r^x, 2B_k) - 2(B_k + B_r^x). \quad (5.10)$$

Yhtälö (5.10) on ehtona sille, että konvoluutiotermit spektrissä (3.50) erottuvat autokorrelaatiotermeistä riittävästi, jotta laskostunut konvoluutiotermi ei joudu päällekkäin kummankaan kanssa. Referenssikentän tulotasoa kohtisuorassa y-suunnassa näytteistämisehdoksi saadaan

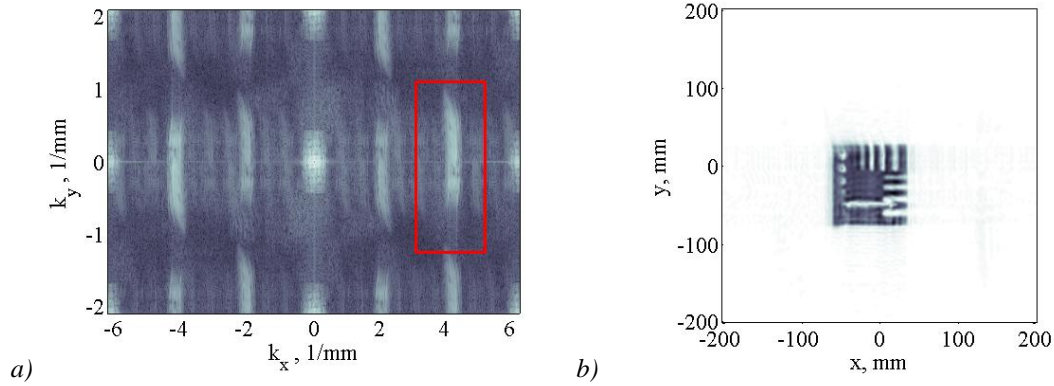
$$k_s^y > 2(B_k + B_r^y). \quad (5.11)$$

Yhtälöissä (5.9) – (5.11) referenssikentän aaltolukukaistanleveydelle saadaan eri arvot x - ja y -suunnassa (erotettu yläindekseihin), sillä palloaaltokenttä riippuu kentän lähteen sijainnista apertuurin suhteen. Mittauksesta (kuva 4.14 b) saadaan referenssikentän aaltolukukaistanleveydeksi x -suunnassa $B_r^x = 415\text{m}^{-1}$, yhtälöstä (4.1) $B_k = 435\text{m}^{-1}$ ja kuvasta 4.5 saadaan $k_{ref.} = 4347\text{m}^{-1}$ ja $k_{maks.} = k_{ref.} + B_k + B_r = 5200\text{m}^{-1}$. Näytteistystaajuudelle x -suunnassa (5.9) siis saadaan $6067\text{m}^{-1} < k_s^x < 6994\text{m}^{-1}$. Referenssikentän aaltolukukaistanleveys y -suunnassa voidaan laskea yhtälöillä (4.6) – (4.8), joilla saadaan $B_r^y = 429\text{m}^{-1}$. Puolta näytteistystaajuutta (kaksinkertainen alinäytteistys) näytteistystaajuutta $k_s^x/2$ ja $k_s^y/2$ vastaavat näytteistysvälit x - ja y -suunnissa saadaan yhtälöllä (3.55):

$$\Delta x = 0,9\text{mm} \dots 1,0\text{mm} \quad \text{ja} \quad \Delta y \leq 3,6\text{mm}. \quad (5.12)$$

Kuvassa 5.31 a ja b on esitetty spektri (3.50) ja saatu millimetriaaltokuva, kun interferenssikuvioita näytteistettiin x -suunnassa 1 mm:n välein ja y -suunnassa 3 mm:n välein (kaksinkertainen alinäytteistys). Millimetriaaltokuvan 5.31 b huomataan yltävän laadultaan lähes kuvan 5.22 a tasolle. Hieman huonompi kuvanlaatu johtuu häiriöistä, jotka sijaitsevat tehospektrin (3.50) autokorrelaatio- ja konvoluutiotermien välissä (liite J), ja jotka summautuvat kuvassa 5.31 a neliöityyn konvoluutiotermiin spektrien laskostuessa. Erityisesti on huomattava, ettei kuvan laatu huonone alinäytteistystyksen aiheuttaman laskostumisen vaan spektrissä olevien mahdollisista ympäristön heijastuksista johtuvan korkeamman kohinatasoin takia. Alinäytteistämällä voitiin näytepisteiden lukumäärää vähentää 215 tuhannesta 54 tuhanteen ilman, että millimetriaaltokuvan erotuskyky olisi laskenut neljäsosaan näytepisteiden mukana. Liitteessä K on esitetty spektri (3.50) ja millimetriaaltokuva, kun hologrammia on alinäytteistetty nelinkertaisesti siten, että

$\Delta x = 2\text{mm}$ ja $\Delta y = 4,5\text{mm}$, jolloin näytepisteiden lukumäärä laskee 13 tuhanteen – 16-osaan alkuperäisestä. Näin suuri alinäytteistys rajoittaa kuvattavan kohteen kokoa jo paljon, jolloin alinäytteistyssoveltuus täytyy arvioida tapauskohtaisesti.



Kuva 5.31. a) alinäytteistetyn hologrammin spektri (3.50), b) ja sillä saatu millimetriaaltokuva. Spektrin neliöity osa on haluttu konvoluutiotermi.

5.3 KUVANKÄSITTELY

Kuvankäsittelyllä pyritään muokkaamaan kuvia siten, että havaitisijalle olennaiset piirteet kuvassa korostuvat. Alkuperäisen kuvan kirkkautta merkitään diskreetillä funktiolla $e(x_i, y_j)$, jolloin käsitellyn kuvan kirkkaus saadaan funktiona $g(x_i, y_j)$. Määrittelemällä erilaisia matemaattisia riippuvuuksia funktioiden välille, kuvaa voidaan muokata lukuisilla tavoilla. Tärkeimpiä kuvankäsittelyn metodeja ovat *gray level mapping* ja *unsharp masking* [48]. Edellinen metodi painottaa kuvan kirkkautta jonkin edeltä määrätyn funktion mukaan, ja jälkimmäinen korostaa kuvassa olevia reunoja.

5.3.1 GRAY LEVEL MAPPING

Kuvan kirkkaus saa uuden arvon kuvapiste kuvapisteeltä funktion T mukaan:

$$g(x_i, y_j) = T(e(x_i, y_j)), \quad (5.13)$$

jossa funktio T voidaan valita halutulla tavalla. Yleisimpiä valintoja funktioksi ovat *contrast stretching* -funktio, logaritminen funktio ja käänteinen logaritminen funktio.

contrast stretching -funktio on muotoa

$$\begin{aligned}
T(e(x_i, y_j)) &= \frac{g_1}{f_1} e(x_i, y_j), \quad \text{kun } e(x_i, y_j) \leq e_1 \\
\frac{g_2 - g_1}{e_2 - e_1} e(x_i, y_j), \quad &\text{kun } e_1 \leq e(x_i, y_j) \leq e_2, \\
\frac{1 - g_2}{1 - e_2} e(x_i, y_j), \quad &\text{kun } e_2 \leq e(x_i, y_j)
\end{aligned} \tag{5.14}$$

joissa e_1 ja e_2 ovat alkuperäisen kuvan, ja g_1 ja g_2 ovat käsitellyn kuvan kirkkausarvoja, jotka valitaan siten, että saadaan paloittain määritelty funktio. Valitulla funktiolla voidaan painottaa kuvassa olevia tummia ja vaaleita kohtia.

Logaritminen funktio on muotoa

$$g(x_i, y_j) = b \log(d + a e(x_i, y_j)), \tag{5.15}$$

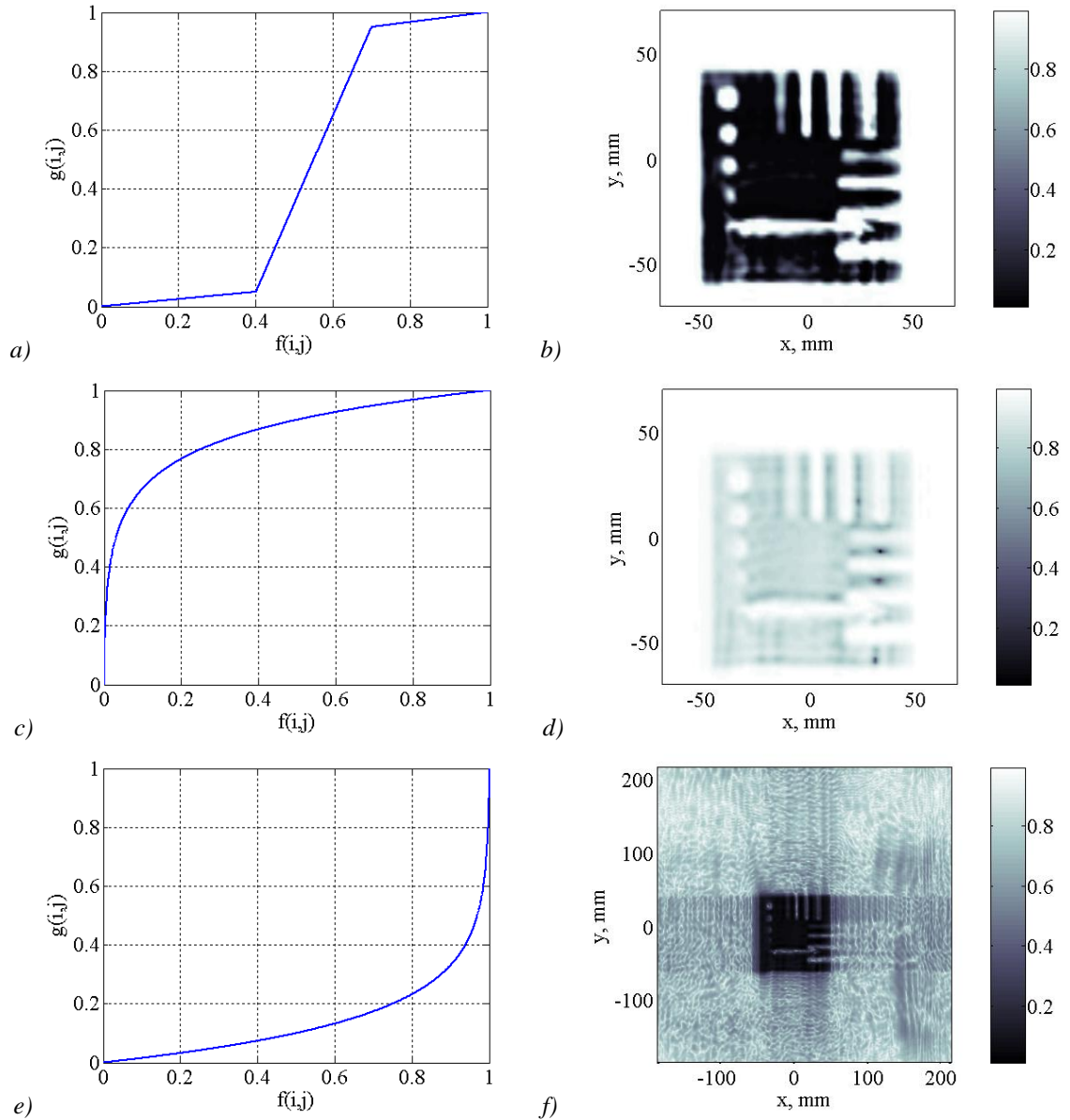
ja käänteinen logaritminen funktio on muotoa

$$g(x_i, y_j) = 1 - b \log(d + a [1 - e(x_i, y_j)]), \tag{5.16}$$

jossa a , b ja d ovat vapaavalintaisia vakioita. Logaritmisella funktiolla voidaan skaalata kuvan kirkkautta siten, että vaaleat alueet saavat lähes vakion kirkkauden ja tummat alueet saavat kaikkia kirkkauden arvoja. Päinvastainen pätee käänteiselle logaritmiselle funktiolle.

Yllä esitetyt algoritmit perustuvat funktioon, jonka avulla kullekin kuvapisteelle määrätään uusi kirkkausarvo alkuperäisen kirkkausarvon perusteella. Käytännössä kuvauslaitteen antamassa kuvassa on rajallinen määrä eri kirkkausarvoja (harmaasävyjä), joten funktioiden (5.14) – (5.16) kaikki mahdolliset arvot voidaan taulukoida ja algoritmi voidaan suorittaa millimetriaaltokuvalla yksinkertaisella haulla taulukosta.

Kolme erilaista *gray level mapping* -algoritmia on esitelty kuvissa 5.32 a–f. Kuvan 5.32 a mukaista paloittain määriteltyä funktiota käytettiin *contrast stretching* -algoritmissa. Algoritmi skaalaa kuvan tummat alueet alkuperäistä tummemmiksi siten, että alueilla olevien kuvapisteiden kirkkausvaihtelut samalla pienenevät. Samoin alkuperäisen kuvan vaaleat alueet skaalataan alkuperäistä vaaleammaksi ja pienemmälle kirkkausalueelle. Alkuperäisen kuvan alueet, jotka sijoittuvat harmaasävyyskaalan keskivaiheille, saavat lähes kaikkia kirkkausarvoja. Algoritmin vaikutus on esitetty kuvassa 5.32 b. Tumma testikuvio ja vaalea tausta ovat nyt korostuneet kuvassa. Testikuvion lähellä näkyvää aaltoilua ei nyt näy, sillä se on skaalautunut taustan kirkkauden tasolle. Myös testikuvion yksityiskohdat vastaavat nyt paremmin todellisuutta; metallin kohdalta kuva on täysin tumma, ja tyhjän kohdalla kuva on täysin vaalea. Erityisesti reikien pyöreys, ja 6 mm ja 4 mm rakojen suoruus tulee esille käsitellyssä kuvassa.



Kuva 5.32. Erilaisia gray level mapping – algoritmeja: a ja b) contrast stretching, c ja d) logaritminen ja e ja f) käänteinen logaritminen funktio.

Logaritminen funktio, kun $a = 1000$, $d = 1$ ja $b = 1/(a + d)$, on esitetty kuvassa 5.32 c. Nyt alkuperäisen kuvan vaaleiden alueiden kirkkauden vaihtelut poistuvat, ja tummien alueiden vaihtelut korostuvat (kuva 5.32 d). Nyt kohteen taustasta ei voida erottaa yksityiskohtia, mutta testikuvion pinnalla tapahtuvat kirkkauden vaihtelut nähdään hyvin. Samalla korostuu myös kirkkauden vaihtelut, jotka eivät ole todellisia, vaan kuvauksen epäideaalisuuksista johtuvia. Jos kohteen pinnalla olisi vaikkapa jotakin dielektristä materiaalia, joka aiheuttaa vain pienen kirkkauden muutoksen, näkyisi se kuvassa 5.32 d hyvin (vrt. kuvaan 5.32 b, jonka pinnalla ei voida erottaa yksityiskohtia).

Kuvassa 5.33 e on esitetty käänteinen logaritminen funktio samoilla parametrein a , b ja d arvoilla. Nyt alkuperäisen kuvan vaaleiden alueiden kirkkauden vaihtelut korostuvat ja

tummien alueiden kirkkauden vaihtelut vaimenevat (kuva 5.33 f). Nyt testikuvion taustalla olevat kirkkauden muutokset näkyvät hyvin, jolloin kuvassa erottuisi myös huomattavasti testikuviota vähemmän heijastava tausta. Nyt millimetriaaltokuvassa oleva taustan kohina ja rajallisen apertuurin aiheuttama katkaisuvirhe tuovat kuvan taustaan yksityiskohtia. Lisäksi kuvan oikeassa reunassa on nähtävissä mahdollisesti ympäristön heijastuksista johtuva tummempi alue.

5.3.2 UNSHARP MASKING

Kuvassa olevien yksityiskohtien reunoja korostavassa *unsharp masking* -algoritmissa kuvan kirkkaus määräytyy nyt alkuperäisen kuvan kirkkauden ja kirkkaudesta otetun Laplace-operaation mukaan:

$$g(x_i, y_j) = Ae(x_i, y_j) + B\nabla^2 e(x_i, y_j), \quad (5.17)$$

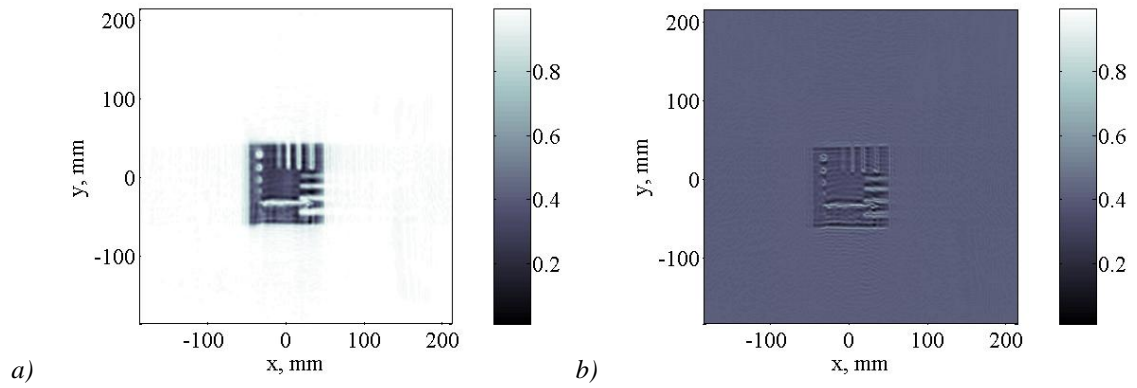
jossa

$$\nabla^2 e = \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e}{\partial y^2}, \quad (5.18)$$

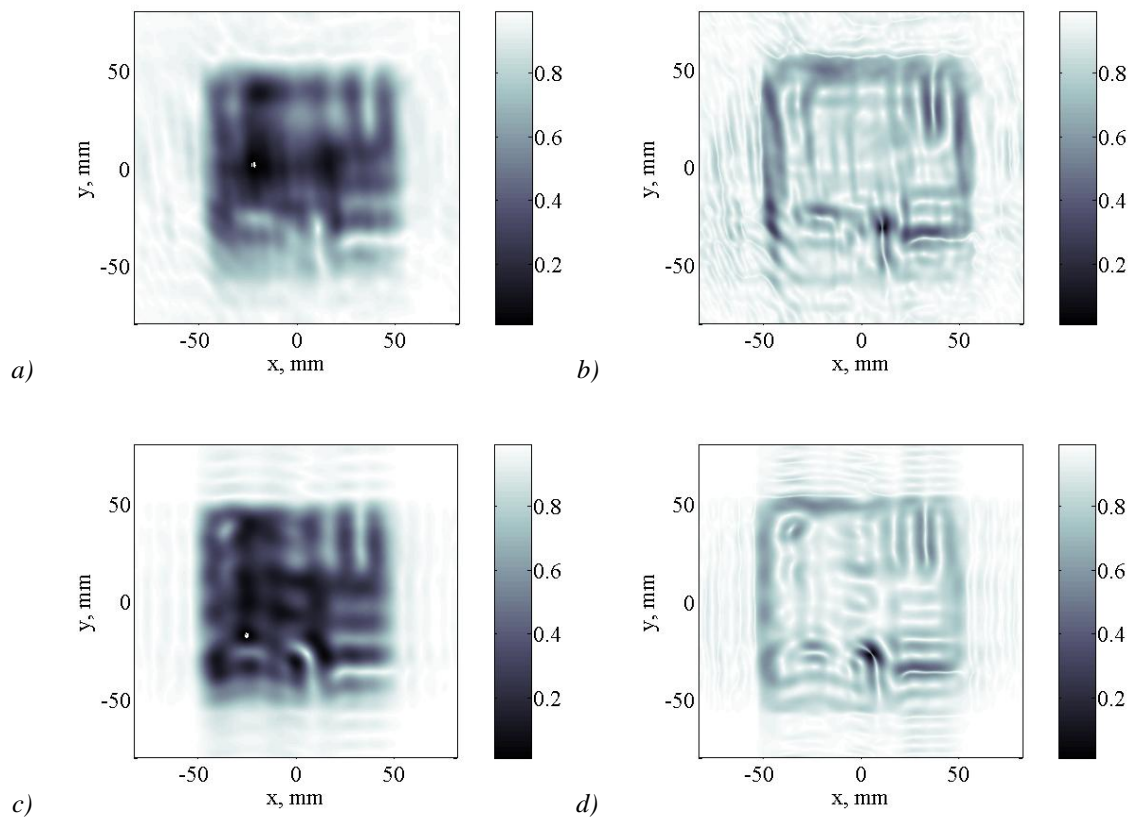
ja A ja B ovat vapaavalintaisia vakioita. Algoritmin voidaan ajatella toimivan siten, että yhtälön (5.17) ensimmäinen termi säilyttää alkuperäisessä kuvassa olevien alueiden kirkkaudet, ja toinen termi korostaa kirkkkauksien nopeita vaihteluita eli kuvassa olevia reunoja.

Alkuperäisen ja *Unsharp masking* -algoritmin tuottamat millimetriaaltokuvat on esitetty kuvissa 5.33 a ja b. Kuvankäsittelyn tuloksena testikuvion reunat saadaan paremmin näkyviin, ja alkuperäisen millimetriaaltokuvassa olevat yksityiskohdat korostuvat. Kuvassa taustan kirkkaus on skaalautunut tummaksi, sillä Laplace-operaattori tuottaa kuvaan kirkkausarvoja, jotka ovat suurempia kuin alkuperäisen kuvan kirkkain kohta. *Unsharp masking* -algoritmi ei kuvassa 5.33 b tee millimetriaaltokuvasta merkittävästi tarkemman näköistä johtuen jo alkuperäisen kuvan hyvästä laadusta.

Kuvankäsittelyssä voidaan käyttää muitakin gradienttiin perustuvia algoritmeja. Kuvissa 5.34 a–d on esitetty alkuperäiset ja käsitellyt millimetriaaltokuvat testikuvion suoralla ja epäsuoralla menetelmällä, kun käytetään tasoaaltoreferenssiä. Algoritmina on käytetty pelkkää gradientin ottamista kuvasta, jolloin muutokset kuvan kirkkaudessa korostuvat. Huomataan, että kuvissa 5.34 b ja d käytetty algoritmi antaa kuvan, jossa yksityiskohtien erottuminen korostuu selvästi verrattuna käsittelemättömään kuvaan.



Kuva 5.33. a) alkuperäinen millimetriaaltokuva, b) unsharp masking -algoritmilla käsitelty kuva.



Kuva 5.34. Millimetriaaltokuvat testikuvioista a) epäsuoralla ja c) suoralla holografisella menetelmällä, kun referenssikenttänä käytetään tasoaaltoa. Kuvissa b ja d) sovelletaan gradientti-algoritmia.

6 POHDINTOJA EPÄSUORASTA HOLOGRAFISESTA KUVAAUKSESTA

Tässä luvussa pohditaan luvuissa 3, 4 ja 5 esitellyn epäsuoran holografisen kuvausmenetelmän suorituskykyä verrattuna luvussa 2 esiteltyihin muihin passiivisiin ja aktiivisiin kuvausmenetelmiin. Lisäksi arvioidaan työssä esitellyn kokeellisen epäsuoran holografisen menetelmän ja kuvauslaitteiston kehitysmahdollisuuksia. Tärkeimpiä tarvittavia parannuksia nyt toteutettuun kuvauslaitteistoon ovat mm.: kuvanmuodostuksen nopeuttaminen laitteiston monimutkaisuuden silti kohtuuttomasti kasvamatta ja kohteen valaisun järjestäminen siten, että apertuurille saadaan mahdollisimman paljon kohteelta sironnutta tehoa myös silloin, kun apertuurin koko on kohdetta pienempi.

6.1 ERI KUVAAUSMENETELMIEN SUORITUSKYVYN VERTAILUA

Taulukossa 6.1 on esitetty luvussa 2 esiteltyihin kuvausmenetelmiin ja luvussa 4 ja 5 esiteltyyn epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyviä ominaisuuksia: kuvausjärjestelmän toimintaperiaate, taajuusalue, apertuurin koko, erotuskyky, näkökenttä ja kuvanmuodostukseen kuluva aika.

Taulukko 6.1. Tässä työssä käsiteltyjen eri kuvausmenetelmien tunnuslukuja

Viite	Toimintaperiaate	Käyttötaajuus, GHz	Apertuurin koko, cm	Erotuskyky, astetta	Näkökenttä, astetta	Kuvausnopeus
[14]	Passiivinen, mekaaninen skannaus	92–96	30, pyöreä apertuuri	0,7...0,8	valittavissa	10...30 min.
[19]	Passiivinen, sähköinen skannaus	76...94	60 x 60	0,3	30 x 20	30 ms
[17]	Passiivinen, polttotasoryhmä	75...111	46, pyöreä apertuuri	0,3	15 x 10	60 ms
[9]	Aktiivinen, suora holografia	27...33	200 x 70	¹ 0,6; 2,5 cm syvyys-suunnassa	¹ 180 x 120	1 s, ² 10 s
Luku 4 & 5	Aktiivinen, epäsuora holografia	310	³ 14 x 14... 40 x 40	³ 0,2...0,07	³ 150 x 21... ⁴ 38 x 11	>5 h

Taulukkoon 6.1 viitteen [9] kuvausmenetelmän kohdalla yläindeksillä 1 tarkoitetaan arviota, sillä kyseistä arvoa ei ole viitteessä suoraan annettu. Yläindeksi 2 merkitsee kuvanmuodostusaikaa, kun laskentaan käytetään vuonna 1998 yleisesti saatavilla ollutta tietokonetta. Tämänhetkisillä tietokoneilla kuvanmuodostusaika on lyhyempi. Taulukossa

viimeisellä rivillä oleva yläindeksi 3 viittaa kuvauksen tuloksiin, kun käytettiin tasoaaltoreferenssiä. Lisäksi on huomattava, että viitteessä [9] ja tässä työssä esitellyssä epäsuorassa holografisessa kuvauksessa tarvittiin mekaanista vastaanottimen liikuttamista vain käytännön syistä. Mekaaninen liike ja pitkä kuvanmuodostusaika eivät ole periaatteellisia ominaisuuksia ko. menetelmille, toisin kuin viitteessä [14] esitellylle menetelmälle.

6.1.1 KOHTEEN VALAISU, APERTUURIN KOKO JA EROTUSKYKY

Tässä työssä esitetty epäsuora holografinen kuvaus toteutettiin noin 3...10 kertaa suuremmalla taajuudella kuin muut taulukossa 6.1 raportoidut menetelmät. Korkeamman taajuuden ansiosta teoreettinen erotuskyky saadaan paremmaksi kuin millään muulla taulukon 6.1 menetelmällä, silloinkin kun käytetty apertuuri on kooltaan vain murto-osa muissa menetelmissä käytetyistä. Kuvattavat kohteet kuitenkin voivat heijastaa valaisukenttää siten, ettei pienelle apertuurille saada kohdekentän tehoa riittävästi, ja saavutettu erotuskyky jää pieneksi. Verrattaessa epäsuoran holografisen kuvauksen tuottamia kuvia kahta erilaista valaisukenttää käytettäessä huomataan, että tasomaisen valaisukentän avulla tasomaisesta kohteesta saadaan apertuurille heijastus, joka on rajoittunut suunnilleen kohteen kokoa vastaavalle alueelle (interferenssikuvio G.1 a liitteessä G), ja saadun kuvan 5.8 a erotuskyky on alle 1 cm (teoriassa ~5 mm) 1,5 m:n päässä apertuurista. Kun valaisuun käytetään Gaussin keilaa, ei kohdekentän teho enää keskity apertuurille ja saatu millimetriaaltokuva on huonolaatuinen. Kasvattamalla apertuurin kokoa koko kohdekenttä mahtuu apertuurille ja saadaan millimetriaaltokuvia, joiden erotuskyky on käytännössä teorian mukainen (2 mm 1,5 m päässä apertuurista). Kohdekentän muoto riippuu eniten kohteesta. Nyt käytetty testikuvio toimii todennäköisesti peilin tavoin, eivätkä kohteen yksityiskohdat sirota valaisukenttää siten, että sen yksityiskohdat vaikuttaisivat kohdekenttään koko apertuurin alueella. Passiivisissa kuvausmenetelmissä mitataan kohteen säteilemää tai heijastamaa tehoa, jonka voi ajatella syntyvän lukuisten pistelähteiden säteillä epäkoherentisti. Nyt jokainen kohta kohteella säteilee tehoa kaikkiin mahdollisiin suuntiin, jolloin apertuurillekin saadaan tietoa koko kohteesta riippumatta apertuurin koosta, ja erotuskyky noudattaa yhtälöä (3.60).

6.1.2 NÄKÖKENTTÄ

Epäsuoran holografisen kuvauksen avulla saadun millimetriaaltokuvan näkökenttä on kapeampi kuin vastaavalla kuvausjärjestelyllä toteutettu suora holografinen menetelmä, sillä apertuurilla mitatun tehon spektristä vain osa sisältää kuvauksen kannalta hyödyllistä informaatiota. Suoralla holografisella menetelmällä saatu tasoaaltospektri sisältää tietoa vain kohteesta, joten se hyödynnetään kokonaan ja saadun kuvan näkökenttä saadaan suoraan apertuurin näytteistysvälistä riippuvasta suurimmasta mitattavasta aaltoluvusta. Referenssikenttä rajoittaa näkökenttää voimakkaimmin sen tulokulmaa vastaavassa suunnassa (x -akselin suunta nyt tehdyssä kokeellisessa työssä). Taulukossa 6.1

yläindeksillä 4 merkitty näkökenttä on rajoittunut toisessakin suunnassa, sillä kuvanmuodostusajan lyhentämiseksi näytteistysväliä y -akselilla kasvatettiin. Lisäksi Gaussin keilan muotoinen referenssikenttä rajoittaa näkökenttää y -suunnassa, sillä kohdekentän spektri leviää konvoluutiossa referenssikentän kanssa. Rajoitus on kuitenkin suhteellisesti huomattavasti pienempi verrattaessa näkökenttään x -suunnassa.

Ilmoitettu näkökenttä vastaa suurempaa kuvakokoa, kuin tässä työssä esitetyt kuvakoot ovat. Kentän laskemisessa (yhtälöt (3.41) ja (3.42)) kohdekentän oletetaan olevan samankokoisella alueella apertuurin kanssa, jolloin lopullisen millimetriaaltokuvan näkökenttää voidaan apertuurin koosta riippumatta kasvattaa *zero padding* – menetelmällä taulukossa 6.1 ilmoitettuun kokoon asti. Menetelmässä mitattuun ja palautettuun kohdekentän tasoaltospektriin lisätään nolla-arvoisia näytteitä niin paljon, että saadaan halutun kokoinen apertuuri. Menetelmällä voidaan laskea apertuuria suuremmalle alueelle jakautunutta kohdekenttää, vaikka erotuskyky ei keinotekoisesti kasvatetun apertuurin myötä paranekaan. Tässä alustavassa työssä valittiin kuitenkin apertuuri, joka on suurempi tai yhtä suuri kuin kuvattava kohde. Valinta osoittautui oikeaksi, kun huomattiin kohdekentän jakautuvan suurelle alueelle edellisessä kappaleessa mainitulla tavalla.

Epäsuoralla holografisella menetelmällä saatujen millimetriaaltokuvien näkökentän on kuitenkin mahdollista olla leveämpi kuin passiivisilla polttotasoryhmään perustuvilla menetelmillä. Polttotasoryhmään perustuvassa kuvausmenetelmässä käytetään peiliä tai linssiä, jotka on optimoitu toimimaan parhaiten akselinsa suuntaan. Holografiset menetelmät toimivat hyvin suurillakin kohdekentän tulokulmilla, mikäli ilmaisimissa käytettyjen antennien vahvistus on kohtuullinen suurilla tulokulmilla.

6.1.3 MUITA HUOMIOITA

Epäsuora (tai suora) holografinen menetelmä on muihin kuvausmenetelmiin verrattuna vikasietoisempi, sillä jokainen kuvapiste saadussa kuvassa muodostuu informaatiosta, jota on kerätty ideaalisesti koko apertuurin alueelta. Yhden vastaanottimen vikaantuminen lukuisten vastaanotinten ryhmässä on tuskin havaittavissa saadussa kuvassa. Luvussa 5.2.5 käsitelty alinäytteistys osoittaa, että epäsuoralla holografisella menetelmällä on mahdollista saada kelvollinen millimetriaaltokuva, vaikka mitatusta interferenssikuvasta valittaisiin vain joka neljäs näytepiste.

Taulukossa 6.1 viitteen [9] kohdalla on mainittu 2,5 cm:n syvyysuuntainen erotuskyky, joka saadaan laajakaistaisella mittauksella luvussa 3.2.3 esitetyllä tavalla. Verrattuna muihin kuvausmenetelmiin, holografinen menetelmä ei olennaisesti muutu monimutkaisemmaksi, jos kuvauksesta halutaan tehdä laajakaistainen. Riittää, että valaisuun käytetään laajakaistaista lähetintä ja että apertuurilla olevat ilmaisimet ovat riittävän laajakaistaisia. Mikäli senttimetriluokan syvyyserotuskyky riittää, ei tarvittava taajuuskaista (B on luokkaa 15 GHz) ole millimetriaaltoalueella kovin tiukka vaatimus. Lisäksi kuvanmuodostusalgoritmi on muokattava luvun 3.2.3 mukaisesti laajakaistaiseksi.

6.2 TARVITTAVIA PARANNUKSIA EPÄSUORAAN HOLOGRAFISEEN KUVAAKSEEN

Tässä työssä esitellyssä kokeellisessa epäsuorassa kuvauksessa tasomainen kohde asetettiin vinosti apertuuriin nähden siten, että valaisukenttä heijastuisi mahdollisimman hyvin apertuurille. Kohteen asennolla oli suuri merkitys apertuurille saatuun kohdekentän tehoon. Vaikka nyt käytetty tasomainen kohde sirottaakin sille tulevaa tehoa vain vähän verrattuna satunnaisen kuvauksen kohteen kaikkiin suuntiin sirottamaan tehoon, vinosti kohteelle tuleva valaisukentän voidaan ajatella heijastuvan kohteesta keskimäärin siten, että suuri osa valaisutehosta ei joudu apertuurille. Käytettäessä tasoaallon tai Gaussin keilan muotoista valaisukenttää, edullisinta olisi, jos valaisukenttä tulisi apertuurin suunnasta likimäärin kohtisuorasti kohteelle, sillä kappaleiden heijastuskerroin on useimmiten suurin juuri kohtisuoralla tulokulmalla. Kohtisuoralla valaisulla välttyttäisiin myös viitteessä [21] mainituista mahdollisista kohteen osien aiheuttamista millimetriaaltovarjoista kohteen pinnalla.

Viitteissä [36], [38] on esitetty optisessa holografiassa käytetty menetelmä, jossa valaisukentän vaiherintamasta muokataan satunnainen, jolloin kohteelta sironnut kenttä etenee satunnaisesti kaikkiin suuntiin. Käytettäessä satunnaista valaisukenttää, kohdekentän teho apertuurilla ei riipu yhtä voimakkaasti kohteen ja valaisukentän asennosta kuin jos käytetään valaisukenttää, jolla on voimakas tasoaaltokomponentti tiettyyn suuntaan. Toisaalta, epäkoherentti valaisu pienentää apertuurille saatavaa suurinta mahdollista kohdekentän tehoa, jolloin satunnaista valaisukenttää käyttävän kuvausmenetelmän erotuskyky voi olla huonompi kuin erotuskyky, joka parhaimmillaan voitaisiin saada käytettäessä koherenttia valaisukenttää.

Kuvauksen nopeuttamiseen liittyy kiinteän, lukuisia ilmaisimia käsittävän apertuurin toteuttaminen skannaukseen perustuvan virtuaalisen apertuurin sijaan. Jotta apertuurilla olevien ilmaisimien määrä olisi kohtuullinen, joudutaan käyttämään pienempää apertuurin kokoa, jolloin saavutettava erotuskyky kärsii. Toisaalta, ilmaisinten lukumäärää voidaan pienentää käyttämällä alinäytteistettyä apertuuria, mikäli luvun 5.2.5 mukainen alinäytteistämisen mahdollistava tulokulma voidaan järjestää.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä on käsitelty erilaisia kirjallisuudessa esitettyjä passiivisia ja aktiivisia radioaaltoihin perustuvia kuvauslaitteita. Passiivisten kuvauslaitteiden toiminta perustuu kappaleiden Planckin lain mukaan säteilemää tehoa kuvaavan kirkkauslämpötilan radiometriseen mittaukseen. Mustan kappaleen kirkkauslämpötila on yhtä suuri kuin sen fysikaalinen lämpötila. Luonnollisten kappaleiden kirkkauslämpötila on aina mustan kappaleen kirkkauslämpötilaa pienempi ja ne myös heijastavat ympäristön kirkkauslämpötilaa. Seurauksena passiivisilla kuvausmenetelmillä saatujen kuvien laatu riippuu voimakkaasti ympäristön kirkkauslämpötilasta, erityisesti sisätiloissa saatujen kuvien kontrasti voi olla huono.

Passiivisissa kuvausmenetelmissä usein käytettävät heterodyne-radiometrit ovat kookkaita, jolloin joudutaan käyttämään vain yhtä tai muutamaa vastaanotinta ja kuvanmuodostus kestää kauan. Kuvanmuodostusta voidaan nopeuttaa käyttämällä antennikeilan sähköistä ohjausta tai polttotasoryhmää. Antennikeilan sähköinen suuntaus voidaan toteuttaa myös signaalinkäsittelyn keinoin, jolloin vastaanotinryhmän sähköinen toteutus yksinkertaistuu.

Aktiivisissa kuvausmenetelmissä kohdetta valaistaan ja kohteen pinnalta heijastunut kenttä mitataan. Jos aktiivisessa menetelmässä käytetään muuttuvaa taajuutta, voidaan eri materiaaleja tunnistaa niille ominaisen absorptiospektrin avulla. Jos kohteen heijastama kompleksinen kenttä tunnetaan, voidaan materiaaleja tunnistaa myös niiden aiheuttaman vaihemuutoksen perusteella. Aktiiviset menetelmät eivät ole yhtä herkkiä ympäristön vaikutuksille kuin passiiviset menetelmät. Aktiivisessa kuvauksessa kenttien mittauksen dynaaminen alue on valaisun ansiosta suurempi kuin passiivisessa kuvauksessa.

Holografinen kuvaus on aktiivinen menetelmä, jossa heijastunut kenttä kohteen pinnalla lasketaan tietyllä etäisyydellä mitatusta kohteelta heijastuneesta kompleksisesta kentästä. Toisin kuin useissa muissa menetelmissä, holografisessa kuvauksessa ei käytetä liikkuvia osia, mikä mahdollistaa nopean kuvanmuodostuksen. Holografisella menetelmällä kohteesta voidaan saada kolmiulotteinen kuva, jos käytetään laajakaistaista tai stereoskooppista holografista menetelmää.

Epäsuorassa holografisessa kuvauksessa mitataan ainoastaan kentänvoimakkuutta, jolloin voidaan käyttää yksinkertaisempaa vastaanotintekniikkaa erotuskyvyn kärsimättä. Epäsuorassa holografisessa menetelmässä käytetään referenssikenttää, joka rajoittaa kuvausmenetelmän näkökenttää verrattuna suoraan holografiseen kuvaukseen. Lisäksi kohteen koko on rajoitetumpi epäsuoralla holografisella menetelmällä.

Tässä työssä toteutettiin kokeellinen epäsuora holografinen kuvausjärjestely. Kuvaus tehtiin 310 GHz:llä pystypolarisaatiolla, ja kompleksisen kohdekentän palauttamiseen käytettiin

kahta eri referenssikenttää: tasoaaltoa ja Gaussin keilaa. Apertuurin koko oli tasoaaltoa käytettäessä $14 \times 14 \text{ cm}^2$. Gaussin keilaa käytettäessä apertuurin koko oli $14 \times 14 \text{ cm}^2 - 40 \times 40 \text{ cm}^2$. Kuvanmuodostusaika oli useita tunteja, sillä vastaanotinryhmä apertuurilla korvattiin yhdellä vastaanottimella, jota liikutettiin apertuurin alueen yli.

Kuvattavina kohteina käytettiin alumiinista suorakaiteen muotoista levyä, eri materiaaleista tehtyjä tankoja ja alumiinista testikuviota, joiden avulla kuvausmenetelmän suorituskkyä voitiin arvioida.

Tasoaaltoreferenssin tapauksessa saadun kuvan kirkkauden dynaaminen alue määritettiin kuvaamalla ilman kohdetta ja kun kohteena oli alumiinilevy. Kahden eri millimetriaaltokuvan kirkkauden ero, dynaaminen alue, oli noin 8,6 dB. Eri materiaalien vaikutusta millimetriaaltokuvaan tutkittiin kuvaamalla metalli-, PVC-muovi- ja puutankoja. Saadussa kuvassa eri tankojen kirkkauksista voitiin laskea materiaalien heijastuskertoimet. Verrattaessa PVC-muovin heijastusta metallin heijastukseen, saatiin PVC-muovin heijastuskertoimeksi 0,27, joka vastaa hyvin muovin permittiivisyyden avulla laskettua heijastuskerrointa. Voimakkaasti eri suuntiin sirottavat tangot aiheuttivat kuviin aaltoilua, jota pyrittiin vaimentamaan ikkunoimalla mitattua interferenssikuviota. Ikkunoinnin seurauksena saatujen kuvien erotuskky kuitenkin huononee, eikä kohteiden koko kuvissa enää vastaa todellisuutta.

Kun epäsuora holografinen kuvaus toteutettiin tasomaisella referenssikentällä, testikuvioista kyettiin erottamaan selvästi 6 mm:n kokoiset raot ja 8 mm:n reikä, kun kohde oli 1,5 m:n päässä apertuurista. Myös 4 mm:n rako näkyi, tosin hyvin epäselvästi millimetriaaltokuvissa. Kuvauksen teoreettinen erotuskky on noin 5 mm 1,5 m:n etäisyydellä apertuurista. Verrattaessa epäsuoran holografisen menetelmän tuottamien kuvien erotuskkyä kuviin, jotka on otettu suoralla holografisella menetelmällä, huomataan, että suoralla menetelmällä saadaan hieman parempi erotuskky. Ero kahden menetelmän välillä ei kuitenkaan ole ratkaiseva, ja molempien menetelmien antamissa kuvissa nähdään samat yksityiskohdat. Tasoaaltoreferenssiä käytettäessä tutkittiin myös kuinka testikuvion kankaalla peittäminen vaikuttaa testikuvioista saatuun millimetriaaltokuvaan. Huomattiin, että paksu farmarikangas muuttaa heijastunutta kenttää niin paljon, ettei testikuvioista ole havaittavissa enää yksityiskohtia. Kankaan alla olevan kappaleen ulkomittoja voidaan kyllä arvioida.

Käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä, testikuvion yksityiskohtia ei saatu näkyviin $14 \times 14 \text{ cm}^2$ apertuurilla. Ainoastaan kohteen ulkomittoja kyettiin arvioimaan. Kuitenkin, sekä suora että epäsuora holografinen menetelmä tuottivat lähes samanlaiset millimetriaaltokuvat, osoittaen kentän palautuksen onnistuvan hyvin myös Gaussin keilan muotoisella referenssikentällä. Kun apertuurin koko oli $40 \times 40 \text{ cm}^2$, saatiin paras erotuskky: 2 mm:n rako erottui hyvin 1,5 m:n päässä testikuvioista. Kuten pienemminkin apertuurin kanssa, myös nyt suora ja epäsuora holografinen menetelmä tuottivat yhtä hyvän millimetriaaltokuvan.

Gaussin keilaa käytettäessä kompleksinen referenssikenttä täytyy tuntea, jotta kompleksinen kohdekenttä kyettäisiin palauttamaan. Suoraan mitatun Gaussin keilan lisäksi kohdekentän palauttamisessa käytettiin simuloitua Gaussin keilaa, ja huomattiin, että myös tällä tavalla palautetulla kohdekentällä saadaan hyvälaatuisia millimetriaaltokuvia.

Laitteiston amplitudimittauksen SNR määritettiin saaduista millimetriaaltokuvista. Lisäämällä keinotekoisesti mitatussa interferenssikuvion amplitudissa olevaa kohinaa ja samalla seuraamalla millimetriaaltokuvan tasaisella alueella olevaa kirkkauden keskihajonnan kasvamista, saadaan signaali-kohina -suhteeksi määritettyä 60 dB. SNR:n pienentyessä huomataan millimetriaaltokuvien laadun alkavan heikentyä SNR:n arvolla 24 dB. Kun SNR on 16 dB, testikuvioista ei enää kyetä erottamaan yksityiskohtia.

Gaussin keilaa käytettäessä millimetriaaltokuvan dynaaminen alue määritettiin samassa kuvassa olevan tasaisen tumman ja vaalean alueen kirkkauksien erona. Myös dynaaminen alue määritettiin SNR:n funktiona, jolloin SNR:n kasvaessa 40 dB:iin dynaaminen alue saturoituu 9,8 dB:iin.

Gaussin keilaa käytettäessä huomataan kohdekentän leviävän tasomaisesta kohteesta laajemmalle alueelle kuin tasoaaltoa käytettäessä. Erotuskyky on siten parempi tasomaisella referenssikentällä, kun käytetään $14 \times 14 \text{ cm}^2$:n apertuuria. Gaussin keilaa käytettäessä kohteesta laajalle alueelle sironnut teho voi olla myös etu kuvattaessa apertuurilla, joka on pienempi kuin kohde.

Epäsuoran holografisen kuvauksen vaatimuksia voidaan helpottaa vähentämällä tarvittavien vastaanotinten lukumäärää alinäytteistämällä apertuurilla mitattavaa interferenssikuviota, jolloin esimerkiksi kuvattavan kohteen koko on rajoittuneempi verrattuna Nyqvistin ehdon mukaiseen näytteistykseen.

Saatujen millimetriaaltokuvien laatua voidaan näennäisesti parantaa käyttämällä kuvankäsittelyä, jolla tiettyjä harmaasävyjä voidaan painottaa tai joiden avulla kuvassa olevat reunoja korostetaan.

VIITTEET

- [1] D. Gabor, "A new microscope principle," *Nature*, vol. 161, s. 777–778, 1948.
- [2] E. N. Leith ja J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52, s. 1123–1130, 1962.
- [3] A. Luukanen, R. H. Hadfield, A. J. Miller ja E. N. Grossman, "A superconducting antenna coupled microbolometer for THz applications," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5411, 2004, s. 121-126.
- [4] A. Luukanen, A. J. Miller ja E. N. Grossman, "Active millimeter-wave video rate imaging with a staring 120-element microbolometer array," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5410, 2004, s. 195-201.
- [5] A. Luukanen ja E. N. Grossman, "Noise and THz rectification characteristics of zero-bias quantum tunneling Sb-Heterostructure diodes," *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 14, s. 664-669, 2004.
- [6] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira ja D. Zimdars, "THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 20, s. 266-280, 2005.
- [7] L. Yujiri, M. Shoucri ja P. Moffa, "Passive millimeter-wave imaging," *IEEE Microwave Magazine*, s. 39-50, 2003.
- [8] J. F. Federici, D. Gary, R. Barat ja D. Zimdars, "THz standoff detection and imaging of explosives and weapons," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5781, s. 75-84, 2005.
- [9] D. M. Sheen, D. L. McMakin ja T. E. Hall, "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, s. 1581–1592, 2001.
- [10] J. Detlefsen, A. Dallinger, S. Huber ja S. Schelkshorn, "Effective reconstruction approaches to millimeter-wave imaging of humans," *Proceedings of the 28th URSI General Assembly*, 2005.
- [11] H. D. Collins, T. E. Hall ja R. P. Gribble, "Ultra wide band millimeter wave holographic "3-D" imaging of concealed targets on mannequins," *Esitetty: 1994 Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Conference*, vol. 14A, 1994, s. 623–627.

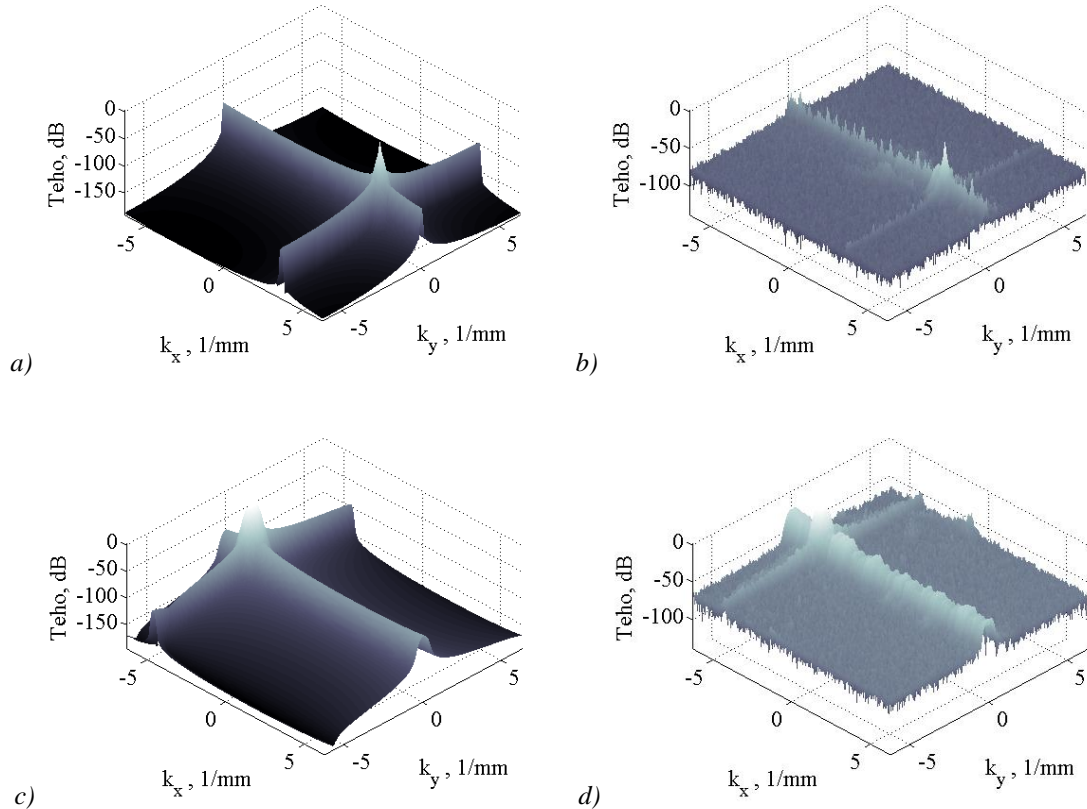
- [12] D. L. McMakin, D.M. Sheen ja H. D. Collins, "Remote concealed weapons and explosive detection on people using millimeter-wave holography," *Proceedings of the 30th Annual International Carnahan Conference*, 1996, s. 19-25.
- [13] M. Hallikainen, *Kaukokartoitus*, Opetusmoniste, Espoo, 2004.
- [14] M. Kantanen, *Passiivinen millimetriaaltokuvaus*, Lisensiaatintutkimus, Espoo, 2006.
- [15] A. H. Lettington, D. Dunn, N. E. Alexander, A. Wabby, B. N. Lyons, R. Doyle, J. Walshe, M. Attia ja I. M. Blankson, "Design and development of a high performance passive mm-wave imager for aeronautical applications," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5410, 2004, s. 210-218.
- [16] A. Semenov, H. Richter, H.-W. Hübers, V. Zakosarenko, T. May, S. Anders, M. Schultz, H.-G. Meyer, E. Kreysa, N. Jethava, K. Il'in ja M. Siegel, "Passive terahertz wave imaging of concealed threats with a single semiconductor bolometer and an array of superconductor bolometers," *Proceedings of 4th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications* (European Space Agency), vol. WPP-258, 2006, s. 411-416.
- [17] G. S. Dow, D. C. W. Lo, Y. Guo, E. W. Lin, T. T. Chung, M. D. Biedenbender, O. Miromontes, A. Marashi, L. Yujiri, P. S. C. Lee, M. M. Shoucri ja B.R. Allen, "Large scale W-band focal plane array for passive radiometric imaging," *IEEE MTT-S. International Microwave Symposium*, vol. 1, 1996, s. 369-372.
- [18] C. Dietlein, A. Luukanen, F. Meyer, Z. Popovic ja E. Grossman, "Phenomenology of passive broadband terahertz images," *Proceedings of 4th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications* (European Space Agency), vol. WPP-258, 2006, s. 405-409.
- [19] J. A. Lovberg, C. Martin ja V. Kolinko, "Video-rate passive millimeter-Wave imaging using phased arrays," *IEEE MTT-S. International Microwave Symposium*, 2007, s. 1689-1692.
- [20] N. A. Salmon, J. Beale, J. Parkinson, S. Hayward, P. Hall, R. Macpherson, R. Lewis ja A. Harvey, "Passive millimetre wave digital beam-forming security imaging," *Proceedings of the SPIE*, vol. 6739, 2007.
- [21] A. Luukanen, P. Helistö, J. S. Penttilä, H. Seppä, H. Sipola, C. R. Dietlein ja E. N. Grossman, "An array of superconducting antenna-coupled microbolometers for passive video-rate THz imaging," *Proceedings of 4th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications* (European Space Agency), vol. WPP-258, 2006, s. 417-422.

- [22] T. Löffler, T. May, C. am Weg, A. Alcin, B. Hils ja H. G. Roskos, "Continuous-wave terahertz imaging with a hybrid system," *Applied Physics Letters*, vol. 90, no. 9, 2007.
- [23] P. H. Siegel ja R. J. Dengler, "Terahertz heterodyne imaging part II: Instruments," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 27, No. 5, s. 631-655 2006.
- [24] D. Zimdars, J. S. White, G. Stuk, A. Chernovksy, G. Fichter ja S. Williamson, "Large area high speed time domain THz imager for security and non destructive evaluation imaging," *Proceedings of the Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, vol. 1, 2005, s. 5-6.
- [25] K. P. Walsh, B. Schulkin, D. Gary, J. F. Federici, R. Barat ja D. Zimdars, "Terahertz near-field interferometric and synthetic aperture imaging," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5411, 2004, s. 9-17.
- [26] M. Leach, M. Elsdon, S. J. Foti ja D. Smith, "Imaging dielectric objects using a novel synthetic off-axis holographic technique," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, s. 1957 – 1961, 2006.
- [27] D. Smith, M. Elsdon, M. Leach, M. Fernando ja S. J. Foti, "3D microwave imaging for medical and security applications," *Proceedings of the international RF and Microwave Conference*, 2006, s. 233-237.
- [28] A. Luukanen, A. J. Miller ja E. N. Grossman, "Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5789, 2005, s. 127-134.
- [29] M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald ja W. R. Tribe *Proceedings of the SPIE*, vol. 5070, 2003, s. 44-52.
- [30] MMA memo 187: "Modeling of the submillimeter opacity on Chajnantor", <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma187/memo187.html>, vierailtu: 9.10.2007.
- [31] E. N. Grossman, A. Luukanen ja A.J. Miller, "Terahertz active direct detection imagers," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5411, 2004, s. 68–77.
- [32] P. Heliö, A. Luukanen, L. Grönberg, J. S. Penttilä, H. Seppä, H. Sipola, C. R. Dietlein ja E. N. Grossman, "Antenna-coupled microbolometers for passive THz direct detection imaging arrays," *Proceedings of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference*, 2006, s. 35-38.

- [33] J. F. Federici, D. Gary, R. Barat, B. Schulkin, F. Huang, H. Altan, R. Barat ja D. Zimdars, "Terahertz imaging using an interferometric array," *Applied Physics Letters*, vol. 83, no. 12, s. 2477-2479, 2003.
- [34] J. F. Federici, D. Gary, R. Barat ja D. Zimdars, "Terahertz imaging using an interferometric array," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5790, 2005, s. 11-18.
- [35] G. Tricoles ja N. H. Farhat, "Microwave holography: Applications and techniques," *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, 1977, s. 108-121,
- [36] L. B. Lesem, P. M. Hirsch ja J.A. Jordan Jr., "Computer synthesis of holograms for 3-D display," *Communications of the ACM*, vol. 11, no. 11, s. 661-674, 1968.
- [37] D. Slater, *Near-Field Antenna Measurements*, 1. painos, Artech House Inc., Norwood, MA., USA, 1991, 310 s.
- [38] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 1. painos, McGraw-Hill Book Company, San Francisco, CA., USA, 1968, 287 s.
- [39] Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams ja R. G. Yaccarino, "The UCLA bi-polar planar-near-field antenna-measurement and diagnostics range," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 37, No. 6, 1995.
- [40] J. Turunen, *Diffraaktiivinen optiikka*, Opetusmoniste, Joensuu, 2004.
- [41] E. Noponen, J. Häkli, T. Koskinen, A. Lönnqvist, V. Viikari, J. Ala-Laurinaho, J. Mallat ja A. V. Räisänen, "Synthesis of reflection-type phase hologram for compact antenna test range at 310 GHz," *Proceedings of 4th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications* (European Space Agency), vol. WPP-258, 2006, s. 391-396.
- [42] J. Säily, *Instrumentation of A Submillimetre Wave Hologram Compact Antenna Test Range*, Teknillisen korkeakoulun Radiolaboratorion julkaisuja: Report S 262, Espoo, 2003.
- [43] J. Häkli, *Shaped Reflector Antenna Design and Antenna Measurements at Sub-mm Wavelengths*, Teknillisen korkeakoulun Radiolaboratorion julkaisuja: Report S 281, Espoo, 2006.
- [44] I. Lindell, K. Nikoskinen, *Antenniteoria*, 4. painos, Otatieto, Espoo, 1995, 347 s.
- [45] A. Lönnqvist, A. Tamminen, J. Mallat ja A. V. Räisänen, "Monostatic reflectivity measurement of radar absorbing materials at 310 GHz," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 9, s. 3486-3491, 2006.
- [46] S.-G. Häggman, *Signaalit ja järjestelmät*, Opetusmoniste, Espoo, 2004.

- [47] RF-cafe: "Dielectric Constant, Strength, & Loss Tangent", http://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectric_constants_strengths.htm, vierailtu: 9.10.2007.
- [48] R. C. Gonzalez ja R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 2. painos, Prentice Hall Inc., New Jersey, USA, 2002, 793 s.

LIITE A: REFERENSSIKENTTIEN TASOAALTOSPEKTRIT



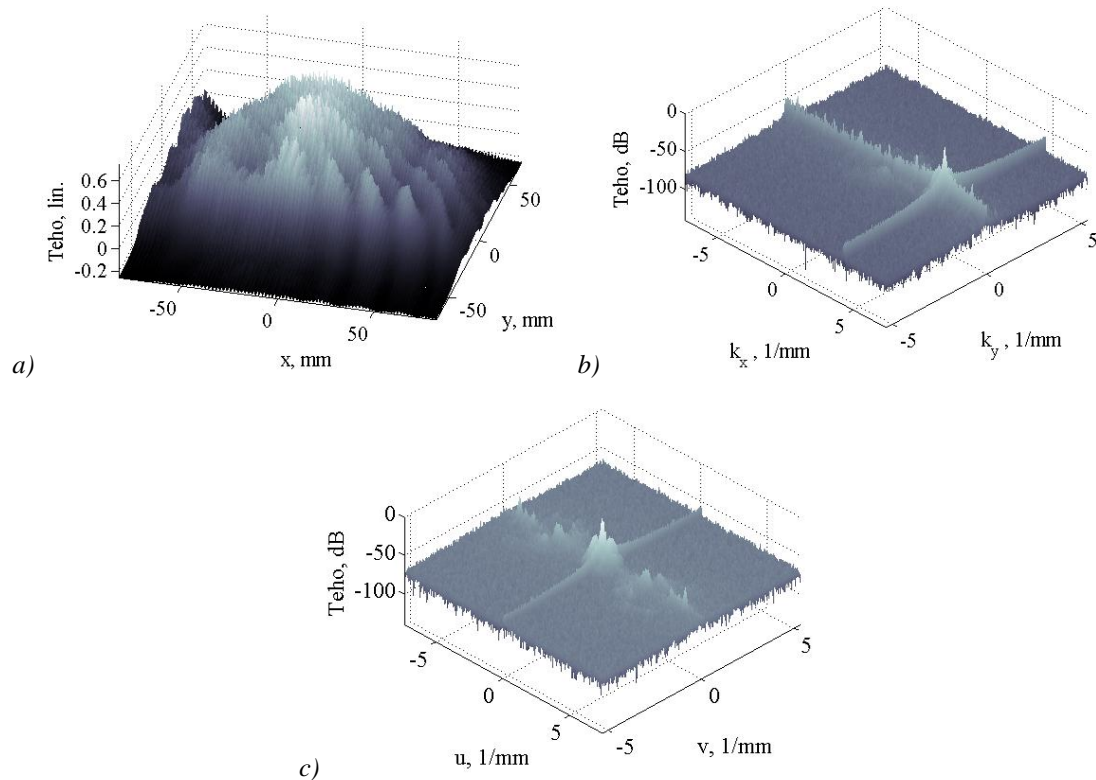
Kuva A.1. Simuloitu ja mitattu tasoaaltospektri a, b) tasoaallon ja c, d) Gaussin keilan muotoiselle referenssikentälle.

Kuvissa A.1 a...b on esitetty tasoaaltospektrit tasoaallon ja Gaussin keilan muotoiselle referenssikentälle, kun referenssikenttien (keskimääräinen) tulokulma apertuurille on 33° ja 42° x - ja z -akselin muodostamassa tasossa z -akseliin nähden. Simuloidussa tasoaaltospektrissä (kuva A.1 c) Gaussin keilan lähdettä approksimoidaan pallolähteellä, joka on yhtä kaukana (0,903 m) apertuurin keskipisteestä kuin todellisuudessa mitatun tasoaaltospektrin tapauksessa (kuva A.1 d). Varsinkin mitatun Gaussin keilan tasoaaltospektrissä on katkaisuvirheestä johtuva laajakaistainen artefakti. Tasoaallon mitatussa tasoaaltospektrissä artefaktia ei näy, sillä heijastustyyppisellä vaihehologrammilla luodun tasoaallon amplitudi vaimenee nopeasti sen suunnitellun halkaisijan ulkopuolella.

LIITE B: KUVAAUSALUEEN KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ ILMAN KOHDETUKEA

Taulukko B.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Aperttuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1}, (astetta aperttuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
$T, 33$	14×14	$0,5/0,5$	$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$	-



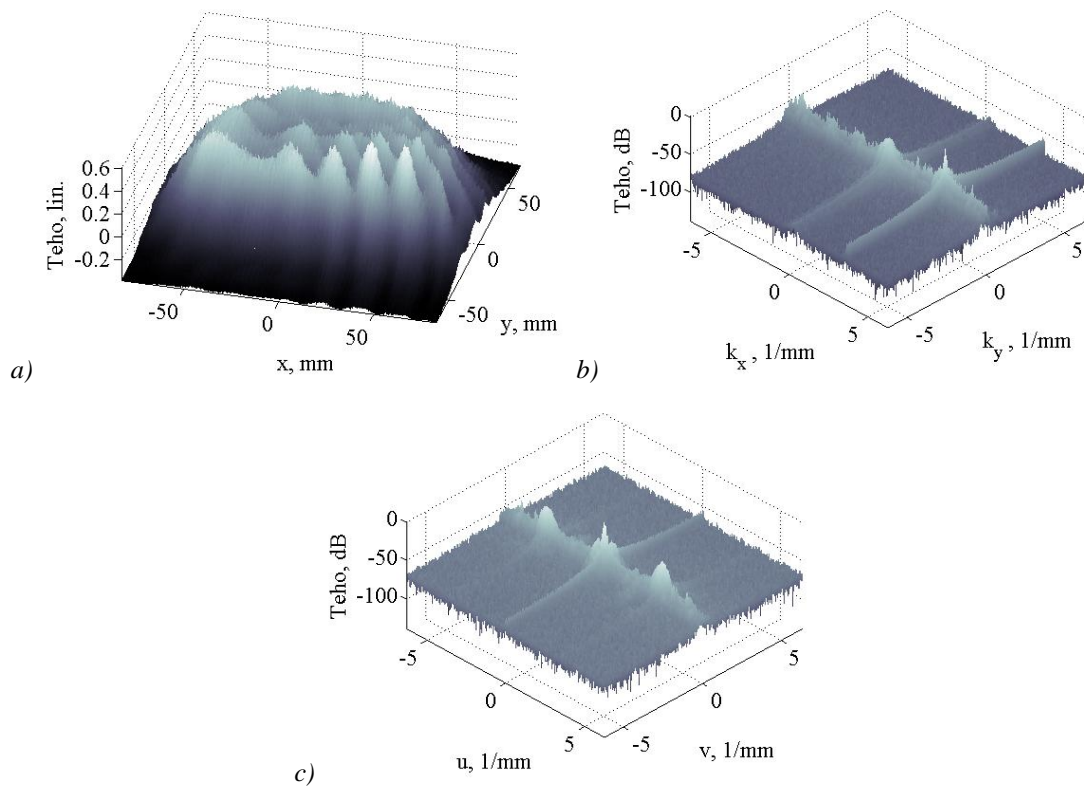
Kuva B.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä tasoaaltoa referenssikenttänä. Kuvattavaa kohdetta ei ollut.

Kuvissa B.1 a...c on esitetty aperttuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Interferenssikuvion ikkunointia ei ole käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavaa kohdetta ei ollut, ja kuvausalue oli peitetty absorbaattoreilla. Mitatusta interferenssikuvioista ja tasoaaltospektristä (kuvat B.1 a ja b) voidaan kuitenkin päätellä, että aperttuurille saatiin myös kuvausalueen suunnasta heijastuksia, jotka näkyvät saadussa millimetriaaltokuvassa. Referenssikentän vaikutus näkyy interferenssikuvion jaksollisena vaihteluna kuvassa B.1 a.

LIITE C: KUVAAUSALUEEN KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ KOHDETUEN KANSSA

Taulukko C.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Aperttuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1}, (astetta aperttuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
$T, 33$	14×14	$0,5/0,5$	$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$	-



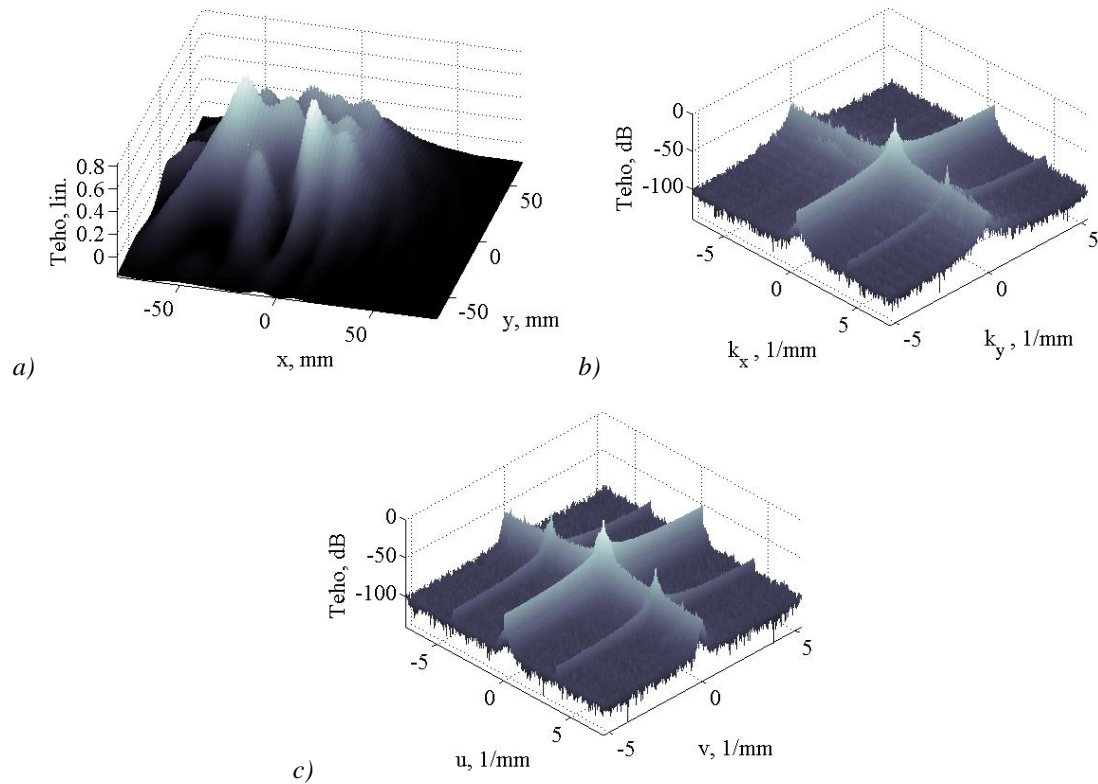
Kuva C.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä tasoaaltoa referenssikenttänä. Kuvausalueella oli vain kohteen tukemiseen käytetty polystyreenituki.

Kuvissa C.1 a...c on esitetty aperttuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Interferenssikuvion ikkunointia ei ole käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavaa kohdetta ei ollut, mutta kuvauksessa käytetty kohteen polystyreenituki oli jätetty paikoilleen. Mitatusta interferenssikuvioista ja tasoaaltospektristä (kuvat C.1 a ja b) nähdään polystyreenituen aiheuttama heijastus, joka näkyy myös millimetriaaltokuvissa.

LIITE D: ALUMIINISEN SUORAKAITEEN KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ

Taulukko D.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta	Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm	Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm	Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1} , (astetta apertuurin akselilla)	Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0 , mm; asteluku p
$T, 33$	14×14	$0,5/0,5$	$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$	-



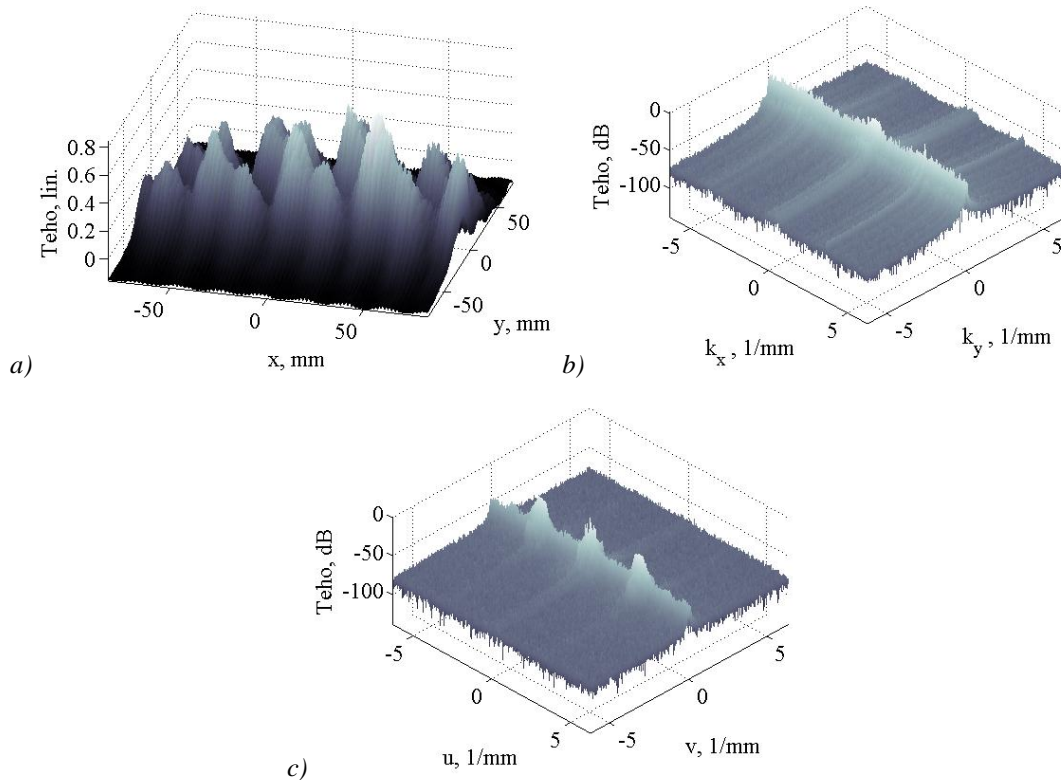
Kuva D.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä tasoaaltoa referenssikenttänä. Kuvattavana kohteena oli $13 \times 17 \text{ cm}^2$ alumiinilevy.

Kuvissa D.1 a...c on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Interferenssikuvion ikkunointia ei ole käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavaa kohdetta oli $13 \times 17 \text{ cm}^2$ alumiinilevy, joka oli suunnattu siten, että valaisukenttä heijastuu mahdollisimman hyvin levystä apertuurille. Tasoaaltospektristä (kuva D.1 b) nähdään levyn aiheuttama voimakas heijastus.

LIITE E: METALLI-, PVC- JA PUUTANKOJEN KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ

Taulukko E.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: $\Delta x / \Delta y$, mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: $\Delta k_x / \Delta k_y$, m^{-1}, (astetta apertuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
$T, 33$	14×14	$0,5/0,5$	$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$	-



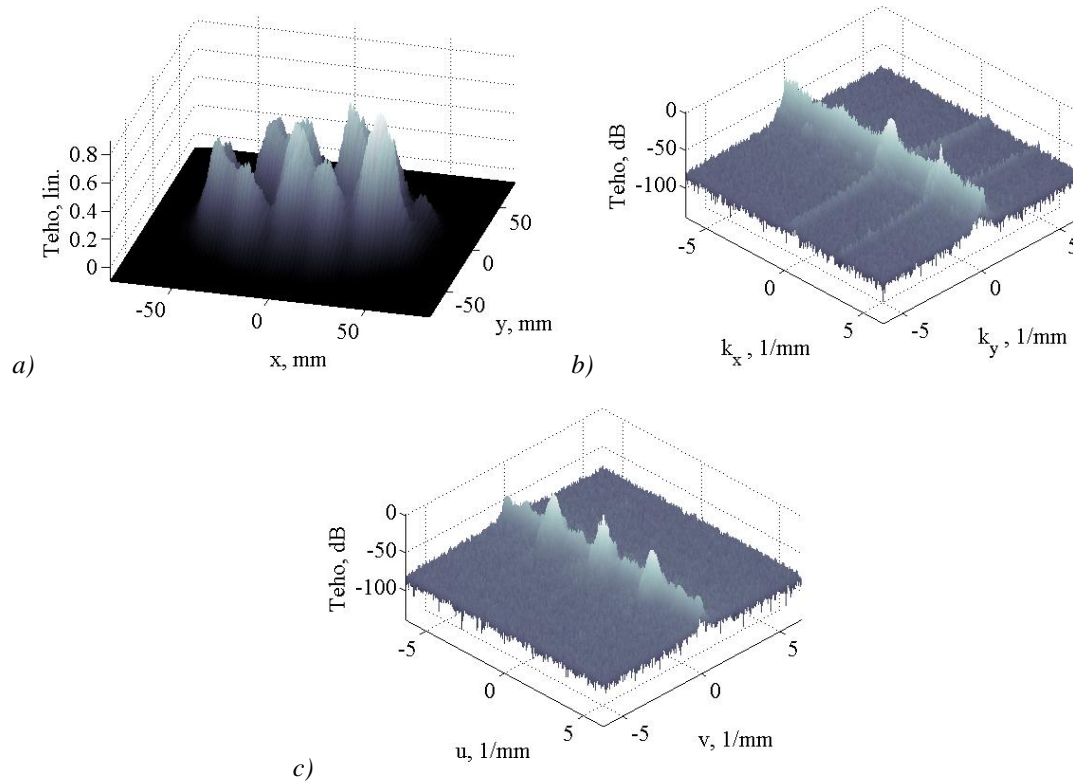
Kuva E.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettävässä tasoaalto referenssikenttänä. Kuvattavana kohteena oli metalli-, PVC-muovi -, ja puutangot.

Kuvissa E.1 a...c on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Interferenssikuvion ikkunointia ei ole käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavana kohteena oli metalli-, PVC-muovi ja puutangot. Interferenssikuvio katkeaa x -suunnassa (kuva E.1 a), mikä aiheuttaa laskettuihin spektreihin (kuvat E.1 b ja c) laajakaistaisen artefaktin. Interferenssikuvion nopea jaksollinen vaihtelu näkyy kuvassa E.1 a.

LIITE F: METALLI-, PVC- JA PUUTANKOJEN KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ, MITATUN AMPLITUDIN IKKUNOINTI

Taulukko F.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Aperttuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1}; (astetta aperttuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
<i>$T, 33$</i>	<i>14×14</i>	<i>$0,5/0,5$</i>	<i>$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$</i>	<i>$120, 12$</i>



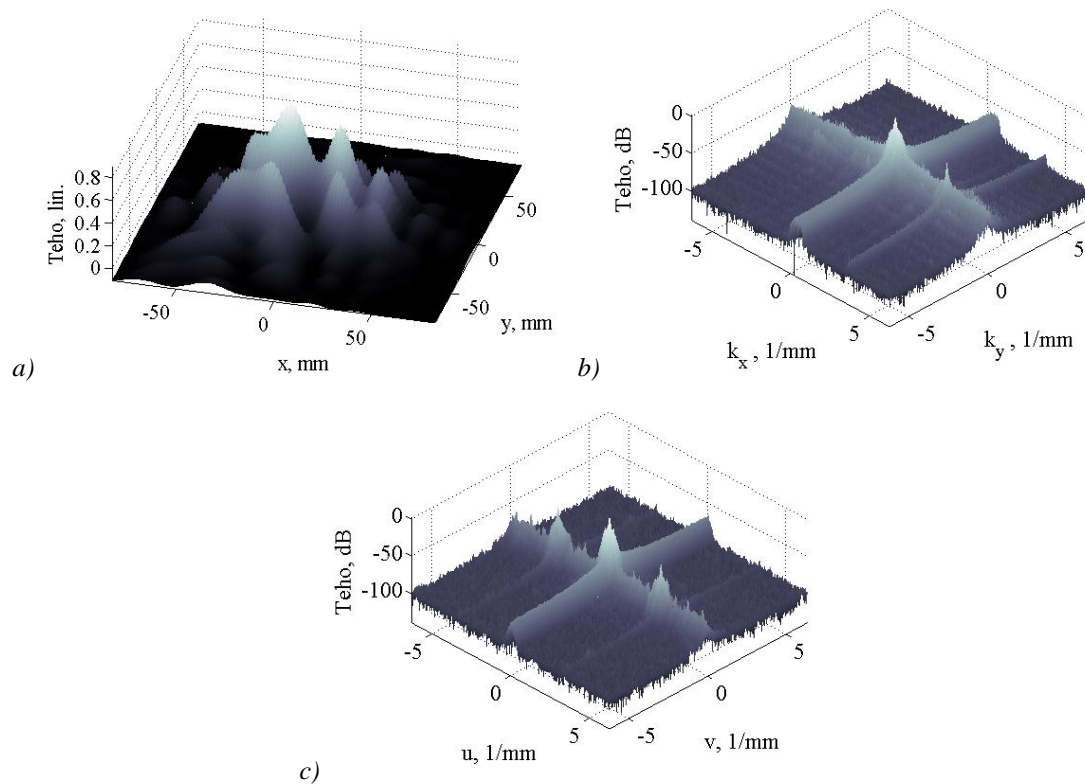
Kuva F.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä tasoaaltoa referenssikenttänä. Kuvattavana kohteena oli metalli-, PVC-muovi -, ja puutangot. Mitattu teho on ikkunoitu spektrien katkaisuvirheen pienentämiseksi.

Kuvissa F.1 a...c on esitetty aperttuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Ikkunointi näkyy interferenssikuvion (kuva F.1 a) vaimenemisena aperttuurin reunoja kohti. Kuvattavana kohteena oli metalli-, PVC-muovi ja puutangot. Kohde- ja referenssikenttä erottuvat hyvin tasoaaltospektrissä (kuva F.1 b) ikkunoinnin ansiosta.

LIITE G: ALUMIINISEN TESTIKUVION KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ

Taulukko G.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1}, (astetta apertuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
$T, 33$	14×14	$0,5/0,5$	$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$	-



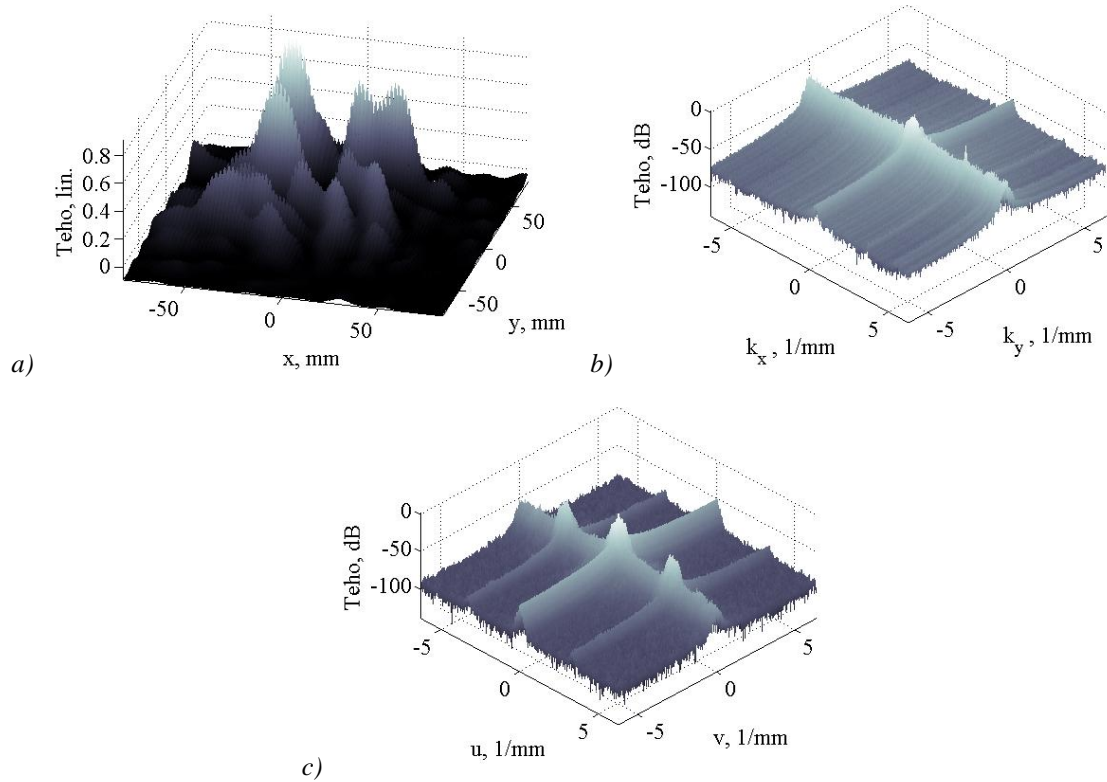
Kuva G.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä tasoaaltoa referenssikenttänä. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä muokattu testikuvio.

Kuvissa G.1 a...c on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Interferenssikuvion ikkunointia ei ole käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä tehty testikuvio. Interferenssikuvio mahtuu kokonaan apertuurin alueelle, jolloin spektrien (kuvat G.1 b ja c) eri komponentit erottuvat k_x - ja k_y –suuntaisesta artefaktista hyvin. Interferenssikuvion nopea jaksollinen vaihtelu näkyy kuvassa G.1 a.

LIITE H: PEITETYN TESTIKUVION KUVAAUS TASOMAISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ

Taulukko H.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1}, (astetta apertuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
$T, 33$	14×14	$0,5/0,5$	$22,4; 22,4 (0,2; 0,2)$	-



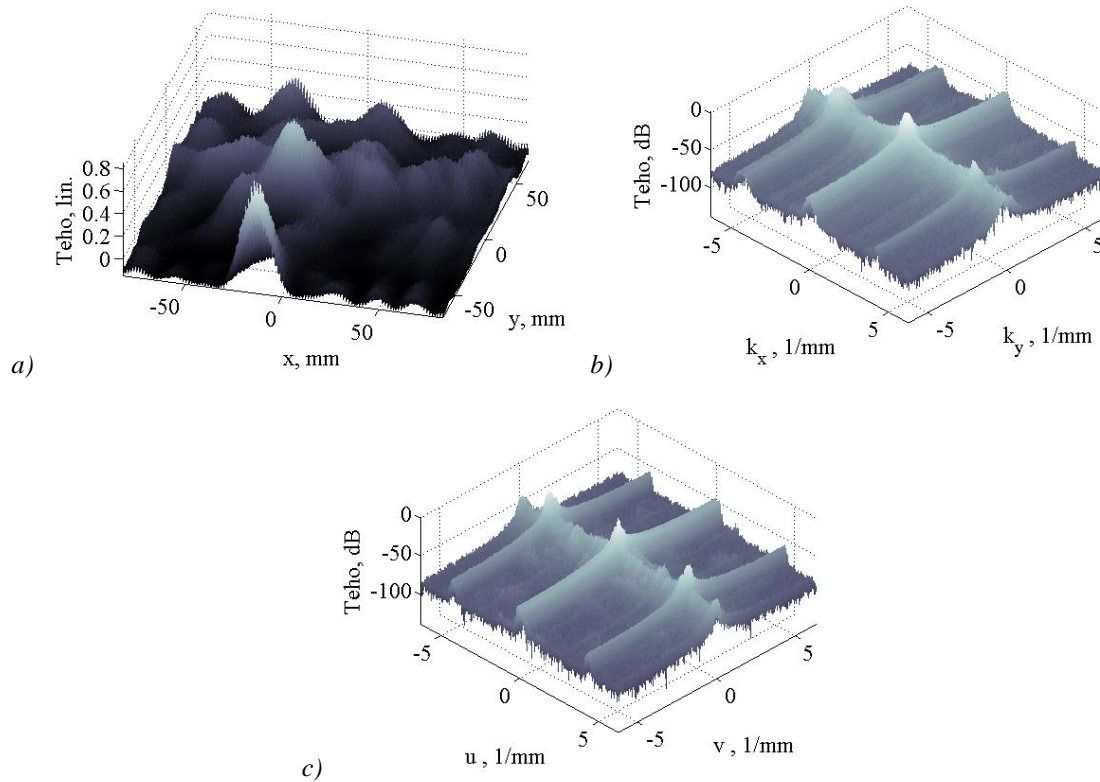
Kuva H.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä tasoaaltoa referenssikenttänä. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä muokattu testikuvio, joka oli peitetty farmarikankaalla.

Kuvissa H.1 a...c on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin tasoaaltokenttää referenssikenttänä. Interferenssikuvion ikkunointia ei ole käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä tehty testikuvio, joka oli peitetty farmarikankaalla. Interferenssikuvio on levinnyt hieman laajemmalle alueelle, jolloin spektreissä voidaan nähdä katkaisuvirheestä johtuva ylimääräinen osa (viivamainen häiriö kuvassa H.1 b).

LIITE I: TESTIKUVION KUVAAUS GAUSSISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ, 14 x 14 CM²:N APERTUURI

Taulukko I.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m⁻¹, (astetta apertuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
<i>G, 42</i>	<i>14 x 14</i>	<i>0,5/0,5</i>	<i>22,4;22,4 (0,2;0,2)</i>	<i>-</i>



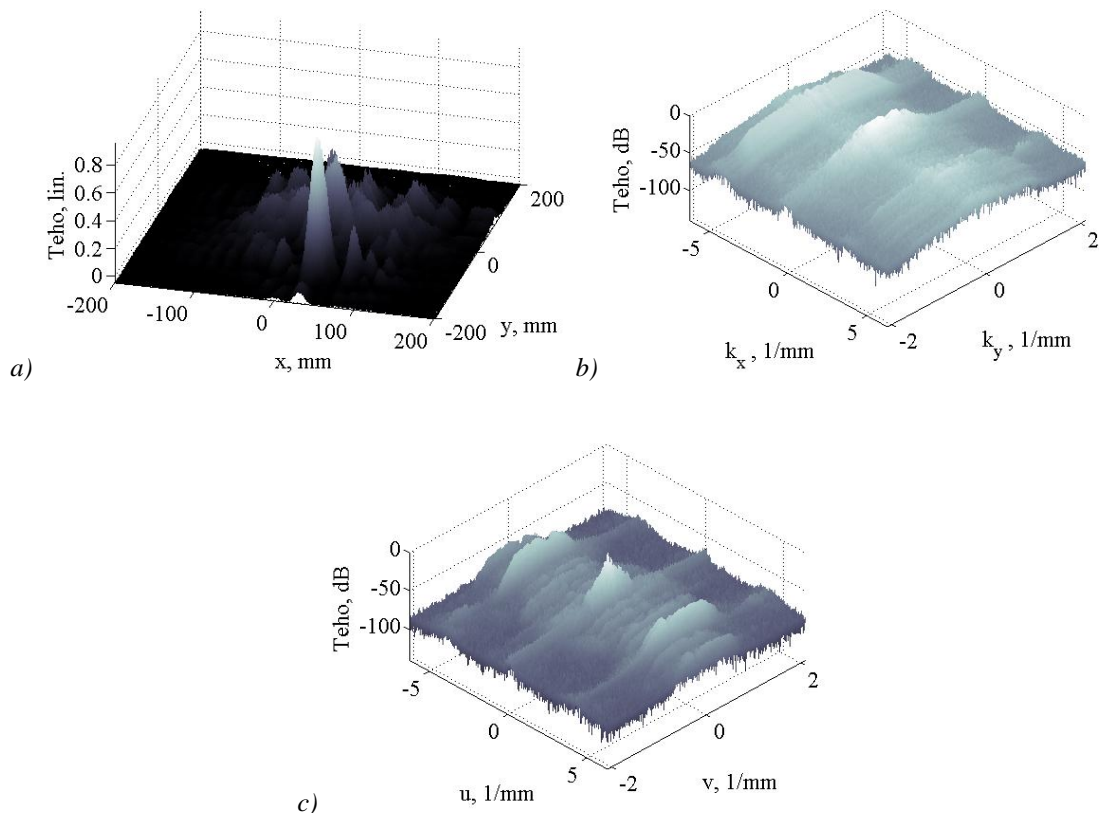
Kuva I.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä muokattu testikuvio.

Kuvissa I.1 a...c on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin Gaussin keilaa referenssikenttänä. Gaussin keilan lähteenä käytetty korrugoitu torviantenni asetettiin 42°:een kulmaan apertuurin normaaliin nähden. Lähteen etäisyys oli 0,9 m apertuurista. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä tehty testikuvio. Interferenssikuvion ikkunointia ei käytetty ennen spektrien laskemista. Interferenssikuvio katkeaa selvästi apertuurin reunalla, jolloin spektreissä voidaan nähdä katkaisuvirheestä johtuva ylimääräinen osa.

LIITE J: TESTIKUVION KUVAAUS GAUSSISELLA REFERENSSIKENTÄLLÄ, 40 x 40 CM²:N APERTUURI

Taulukko J.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta	Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm	Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm	Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m ⁻¹ , (astetta apertuurin akselilla)	Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0 , mm; asteluku p
$G, 42$	40×40	$0,5/1,5$	$7,9; 7,9 (0,07; 0,07)$	-



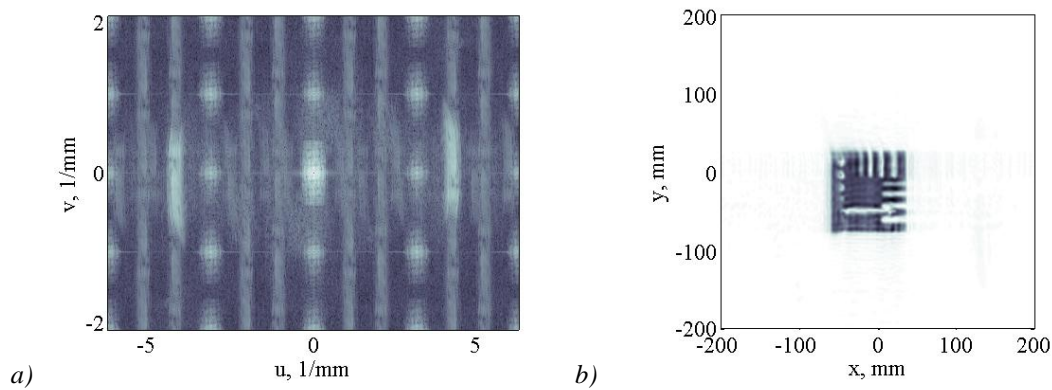
Kuva J.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä. Apertuurin koko oli 40 x 40 cm². Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä muokattu testikuvio.

Kuvissa J.1 a...c on esitetty apertuurilla mitattu interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri. Kuvausmenetelmässä käytettiin Gaussin keilaa referenssikenttänä. Gaussin keilan lähteenä käytetty korrugoitu torviantenni asetettiin 42^o:een kulmaan apertuurin normaaliin nähden. Lähteen etäisyys oli 0,9 m apertuurista. Interferenssikuvion ikkunointia ei käytetty ennen spektrien laskemista. Kuvattavana kohteena oli alumiininen testikuvio. Interferenssikuvio mitattiin suurella apertuurilla (40 x 40 cm²) eikä katkaisuvirhettä juuri synny.

LIITE K: KUVAAUS 4-KERTAISESTI ALINÄYTTEISTETTYLLÄ APERTUURILLA

Taulukko K.1. Epäsuoraan holografiseen kuvaukseen liittyvät parametrit

<i>Referenssikentän tulokulma: $T =$ tasoaalto, $G =$ Gaussin keila, astetta</i>	<i>Apertuurin koko: korkeus x leveys, cm</i>	<i>Näytteistysväli: ($\Delta x / \Delta y$), mm</i>	<i>Aaltolukuerotuskyky: ($\Delta k_x / \Delta k_y$), m^{-1}, (astetta apertuurin akselilla)</i>	<i>Ikkunointiparametrit: puoliarvonleveys D_0, mm; asteluku p</i>
$G, 42$	40×40	$2,0/5,5$	-	-



Kuva K.1. Interferenssikuvio, tasoaaltospektri ja tehon spektri epäsuorassa holografisessa kuvauksessa 310 GHz:llä käytettäessä Gaussin keilaa referenssikenttänä. Apertuurin koko oli $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Kuvattavana kohteena oli alumiinilevystä muokattu testikuvio.

Kuvassa K.1 a on esitetty nelikertaisella alinäytteistyksellä saatu tehon spektri, kun epäsuorassa holografisessa kuvauksessa käytettiin Gaussin keilaa referenssikenttänä. Kuvassa K.1 b on esitetty saatu millimetriaaltokuva.